

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



**Escuela Universitaria de  
Ingeniería Técnica de  
Telecomunicación**



# Estudio teórico y simulación de un OTDR para sistemas de comunicaciones por fibra óptica

---

Proyecto Fin de Carrera

**AUTOR**

---

**Eduardo López Ruano**

**TUTOR**

---

**José Enrique González García**

---

| Marzo 2013-02-12 |

---



## PROYECTO FIN DE CARRERA PLAN 2000

E.U.I.T. TELECOMUNICACIÓN

**TEMA:** Simulación y Procesado en Comunicaciones

**TÍTULO:** Estudio teórico y simulación de un OTDR para sistemas de comunicaciones por fibra óptica

**AUTOR:** Eduardo López Ruano

**TUTOR:** José Enrique González García

**Vº Bº.**

**DEPARTAMENTO:** DIAC

**Miembros del Tribunal Calificador:**

**PRESIDENTE:** Pedro Costa Morata

**VOCAL:** José Enrique González García

**VOCAL SECRETARIO:** Carlos Rueda Frías

**DIRECTOR:**

**Fecha de lectura:** 14 de marzo de 2013

**Calificación:**

**El Secretario,**

### RESUMEN DEL PROYECTO:

Con este proyecto fin de carrera se ha pretendido realizar el estudio teórico y simulación de un OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) de fibra óptica. Esto se ha realizado mediante la GUI de matlab, obteniéndose un programa en el que el se le permite al usuario elegir las características del enlace de fibra óptica que desee visualizar por pantalla, pudiéndose elegir desde el tipo de fibra óptica, a los tipos de conectores etc. Por ello se ha dividido el desarrollo del proyecto en dos fases:

En la primera fase:

Desarrollo del OTDR realizando una interfaz que permita al usuario visualizar distintos tipos de enlaces de fibra óptica que dependerán de los parámetros que se seleccionen antes de realizar la simulación

En la segunda fase:

Uso de la interfaz gráfica creada para simular distintos enlaces tratando de caracterizar los principales problemas de los enlaces de fibra óptica así como maneras de visualizar e identificar los componentes de un enlace

*“Ocúpate y no te preocupes”*

El reflectómetro óptico en el dominio del tiempo, conocido por sus siglas en inglés como OTDR, es un dispositivo muy utilizado en sistemas de comunicaciones por fibra óptica para conocer de una manera rápida y sencilla como varía la potencia óptica a lo largo de la fibra óptica, siendo otro de sus usos frecuentes la localización de fallos y roturas en un enlace. Este proyecto fin de carrera, consiste en la realización mediante Matlab de una interfaz gráfica que permite simular un OTDR para distintos tipos de fibras, conectores y empalmes visualizándose por pantalla la variación de la potencia óptica en función de la distancia, pudiendo ampliar cualquier tramo del enlace que se desee visualizar con mayor detalle.

Los objetivos del proyecto podemos establecerlos en dos partes. Primero, realizar una interfaz que nos permita diseñar un enlace de fibra óptica de forma sencilla, permitiendo además medir desde la atenuación de la fibra a la de un empalme. En segundo lugar, emplear la interfaz desarrollada para comprobar conceptos teóricos, haciendo hincapié en los principales errores de un enlace de fibra óptica real.

Para una mejor visualización y concepción de lo implementado, es necesario revisar los principios básicos de funcionamiento de la fibra óptica y las principales características de un enlace, así como, los distintos dispositivos que lo componen, para después explicar el funcionamiento del OTDR y sus usos; por ello, en los capítulos segundo y tercero, se explican estas nociones básicas, necesarias para un mejor entendimiento del proyecto. Para poder utilizar la interfaz gráfica de usuario, el capítulo cuarto muestra la descripción de las funciones con parámetros, así como el manual de usuario de la interfaz gráfica. En el capítulo quinto se hace una recopilación y estudios de resultados para distintas simulaciones comprobando desde casos sencillos a casos extremos en los que se debe prestar una especial atención a los elementos que componen el enlace, siendo finalmente, en el sexto capítulo donde se presentan distintas conclusiones así como posibles trabajos futuros, a partir de lo realizado.

The optical time domain reflectometer, known as OTDR, is a widely used device in systems for fiber optic communications used to know quick and simply how the optical power its varying along the fiber, with particular emphasis to another of its frequent uses in troubleshooting on a link.

This final project consists in carrying through a graphical interface in Matlab to simulate an OTDR for different types of fibers, connectors and splices, visualizing the variation of optical power as a function of the distance. It is possible to zoom in specific sections to view them with greater detail,

The project objectives can be set in two parts:

- Make an interface that allows us to design a fiber optic link easily and measuring from the fiber attenuation to a splice one.
- Use the interface developed to test theoretical concepts, emphasizing the most important mistakes of a real optical fiber link.

For better visualization and understanding of what it's been implemented, it is necessary to review the basic operating principles of fiber optics and the main characteristics of a fiber link, and also the different types of devices that comprise it, and then explaining also how the OTDR works and its uses, therefore, in second and third chapters, explains these basics needed for a better understanding of the project. To use the GUI, the fourth chapter shows the description of the functions with parameters and the user manual of the GUI. The fifth chapter is a compilation and study of some simulation results for simple cases to check from simply to extreme cases putting special attention to the elements that make up the link. To sum up, in the sixth chapter will appear different conclusions and possible future works for improving the graphical interface or making a new one.

## **ÍNDICE**

<b>1 / Introducción.....</b>	<b>5</b>
<b>2 / Estudio teórico .....</b>	<b>8</b>
2.1 / Introducción .....	9
2.2 / Fibra óptica.....	11
2.3 / Fuentes ópticas .....	13
2.4 / Detectores .....	18
2.5 / Parámetros importantes .....	22
2.6 / Empalmes .....	29
2.7 / Conectores .....	35
<b>3 / Reflectometría óptica en el dominio del tiempo (OTDR).....</b>	<b>37</b>
3.1 / Principios básicos.....	38
3.2 / Análisis de la señal retrodispersada .....	42
<b>4 / OTDR: Desarrollo y manual de usuario .....</b>	<b>46</b>
4.1 / Introducción .....	47
4.2 / Manual de usuario.....	51
<b>5 / Resultados y estudios de simulación .....</b>	<b>62</b>
5.1 / Introducción .....	63
5.2 / Simulación 1 .....	64
5.3 / Simulación 2.....	71
5.4 / Simulación 3.....	74
<b>6 / Conclusiones y trabajos futuros .....</b>	<b>76</b>
6.1 / Conclusiones .....	77
6.2 / Trabajos futuros .....	78
<b>7 / Presupuesto.....</b>	<b>80</b>

7.1 / Presupuesto .....	81
<b>8 / Bibliografía.....</b>	<b>83</b>
8.1 / Bibliografía .....	84
<b>9 / Anexos.....</b>	<b>86</b>
9.1 / Anexo 1: Resonador.....	87
9.2 / Anexo 2: Birrefringencia .....	90
9.3 / Anexo 3: EDFA.....	91
9.4 / Anexo 4: Catálogos de fibras ópticas utilizadas .....	92
<b>10 / Revista.....</b>	<b>105</b>
10.1 / GUI OTDR.....	106

## **1 / Introducción**

### **Sumario**

- Introducción



Desde el comienzo de su existencia el ser humano, siempre ha necesitado una manera cómoda, rápida y fiable de transmitir información, pasando desde las señales de humo a otros sistemas más sofisticados que permiten comunicarse en tiempo real y a grandes distancias, sin necesitar por ello una gran infraestructura.

La fibra óptica es un medio de transmisión empleado habitualmente en redes de datos, se trata de un hilo muy fino de material transparente, vidrio o materiales plásticos, por el que se envían pulsos de luz que representan los datos a transmitir. El haz de luz queda completamente confinado y se propaga por el interior de la fibra con un ángulo de reflexión por encima del ángulo límite de reflexión total, en función de la ley de Snell. La fuente de luz puede ser un diodo láser o un LED (Light emitting diode).

Las fibras se utilizan ampliamente en telecomunicaciones, ya que permiten enviar gran cantidad de datos a largas distancias, con velocidades similares a las de radio o cable. Son el medio de transmisión por excelencia al ser inmune a las interferencias electromagnéticas. También se utilizan para redes locales, en donde se necesite aprovechar las ventajas de la fibra óptica sobre otros medios de transmisión.

Como en todo sistema de comunicaciones será necesario desarrollar dispositivos que ayuden a la localización de posibles fallos o averías y que ayuden en el mantenimiento de los sistemas de fibra óptica. Esta función la cumple el OTDR (Optical Time Domain Reflectometer), un instrumento que emite pulsos de luz a la longitud de onda deseada, para después medir sus “ecos” o el tiempo que tarda en recibir una reflexión a lo largo de la fibra óptica.

El objetivo de este proyecto será desarrollar un OTDR mediante una interfaz gráfica y analizar los resultados obtenidos. De forma sencilla se podrá comprobar cómo varía la potencia óptica en función de la distancia para distintas longitudes de ondas, así como, para distintas fibras ópticas, empalmes y conectores.

Para una mejor comprensión de lo implementado, es necesario revisar las nociones teóricas básicas sobre fibra óptica y conocer la forma en la que funciona el OTDR, en los capítulos segundo y tercero. Para poder utilizar la interfaz gráfica desarrollada, en el

capítulo cuarto se muestra el manual de usuario, explicando los posibles enlaces de fibra óptica que podremos simular. En el capítulo quinto se hace un estudio de los varios ejemplos que nos muestran las posibilidades de la interfaz realizada, comentando desde los distintos tipos de enlaces que se pueden simular como las mejores formas de visualizar cada característica del mismo.

## **2 / Estudio teórico**

### **Sumario**

- Introducción
- Fibra óptica
- Fuentes ópticas
- Detectores
- Parámetros importantes
- Empalmes
- Conectores

## 2.1 / Introducción

Para estudiar correctamente la luz, debemos considerar a la misma como una onda electromagnética transversal. En el caso de fibras ópticas utilizadas para la transmisión de datos, es suficiente con utilizar una aproximación escalar (tanto en fibras monomodo como multimodo), para describir la propagación.

Para que sea posible realizar esta simplificación, es necesario que el ancho de haz del rayo de luz sea mucho más pequeño que la longitud de onda. Para continuar nuestro estudio, consideraremos que el campo eléctrico que se propaga por el interior de la fibra es de la siguiente forma:

(2.1)

$$E = E_0(x, y) \cos(\omega t - \beta z)$$

Pero será más conveniente expresar la ecuación anterior como un fasor:

(2.2)

$$E = E_0(x, y) e^{j(\omega t - \beta z)}$$

La propagación de ondas en un medio cumple la ecuación de onda de dicho medio. Para el caso de la expresión de la ecuación (2.2), considerando que el campo eléctrico se propaga en la dirección del eje z, tendremos la siguiente ecuación de onda:

(2.3)

$$\nabla_t^2 E_z(x, y) + \beta_t^2 E_z(x, y) = 0$$

Antes de continuar debemos indicar que significan algunas de las variables utilizadas en la ecuación anterior:

$$\nabla_t^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \text{ [Laplaciano de un vector]}$$

$$\beta_t^2 = k^2 n^2 - \beta^2 \text{ [Constante de fase]}$$

$$K = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ [Constante de propagación]}$$

$$n(x, y) \text{ [Índice de refracción del medio]}$$

Como es lógico hay una expresión equivalente para el campo magnético según la dirección del eje z. Debemos calcular únicamente las componentes  $E_z$  y  $H_z$ , ya que las variables x e y de los campos se obtienen gracias a las ecuaciones de Maxwell.

## 2.2 / Fibra óptica

Para un medio infinito, homogéneo e isotrópico, la luz se puede propagar como una onda plana pudiendo su constante de fase tomar cualquier valor, limitado únicamente por la frecuencias disponibles.

Cuando la luz es confinada en una región específica del espacio, la constante de fase  $\beta$ , solo podrá tomar un conjunto de valores. Cada posible valor de la constante de fase representa un modo de propagación, sabiendo que cada modo se corresponde con un camino diferente. Para cada modo de propagación deberemos calcular su ecuación de onda. Con el fin de facilitar estos cálculos, para fibra óptica pasaremos la ecuación a coordenadas cilíndricas, utilizando las coordenadas  $r$ ,  $\phi$  y  $z$ .

Cada solución depende del índice de refracción de la fibra utilizada. Las soluciones para los modos pueden ser TE, TM o modos híbridos. Cuando varios de estos modos se agrupan dan lugar a los modos LP que son los modos propagados por la fibra óptica. Los modos  $LP_{lm}$ , suelen ir acompañados de dos subíndices,  $l$  y  $m$ , que están relacionados con el número de ceros en la coordenada radial y acimutal de la fibra respectivamente. El modo fundamental se denomina  $LP_{01}$ . A continuación, se muestra el esquema de una fibra óptica:

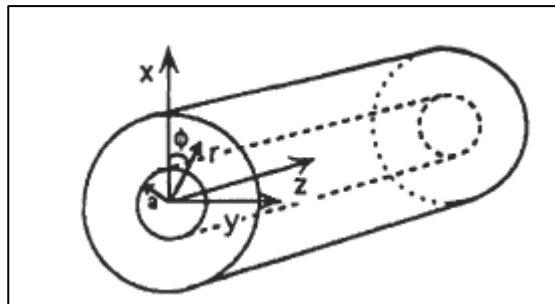


Figura 2.1 Esquema de una fibra óptica común

Para saber rápidamente si un modo  $LP_{lm}$  se propaga debemos definir dos factores importantes, que son  $V$  y  $b$ .

(2.4)

$$V = ka\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \approx \frac{2\pi}{\lambda} n_1 \sqrt{2\Delta}$$

Siendo:

“a” = el diámetro del núcleo

$\lambda$  = la longitud de onda de la luz

$$\Delta \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}.$$

El parámetro V, suele denominarse frecuencia normalizada.

La constante de propagación normalizada b, se define como:

(2.5)

$$b = \frac{\left(\frac{\beta^2}{k^2}\right) - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2}$$

Donde  $\beta$  es la constante de fase del modo  $LP_{lm}$ , k es la constante de propagación en el vacío y  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción del núcleo y del revestimiento respectivamente.

Para que la luz se propague por el interior de la fibra se debe cumplir que el ángulo de incidencia entre el núcleo y el revestimiento sea superior al ángulo crítico, de lo contrario los modos que no cumplieran esta condición irían perdiendo energía progresivamente, la cual se escaparía hacia el revestimiento.

## **2.3 / Fuentes ópticas**

Existen dos tipos de dispositivos usados para transmitir la luz por una fibra óptica. Estos son los Láseres y los LED's.

### **2.3.1 / Generación de luz**

La luz en las fuentes ópticas se produce gracias al rápido paso de un electrón de una capa de mayor energía a otra de menor energía. Cuando se produce en un material electroluminiscente la energía frecuentemente se transmite en forma de luz. Por supuesto, esto solo se da en ciertos tipos de materiales.

La emisión de luz en forma de fotones puede ser de forma espontanea o de forma estimulada:

- Emisión de forma espontanea: Se da cuando el electrón es elevado a un estado con mayor energía. Pero al ser inestable el electrón vuelve rápidamente (algunos picosegundos) al estado anterior liberando parte de la energía en forma de un fotón. La dirección y sentido de este fotón son aleatorias pero su longitud de onda dependerá de la energía liberada.
- Emisión estimulada: Esta es la emisión común de los láseres. En algunas situaciones cuando un electrón pasa a un estado con mayor energía (excitado), es capaz de estar en ese nivel durante un tiempo (algunos microsegundos) antes de cambiar de estado de forma espontanea. Cuando el electrón se encuentra en este estado puede ser estimulado por un fotón generándose otro fotón. Es de gran importancia señalar, que cuando se da la emisión estimulada, el fotón resultante tiene la misma longitud de onda, fase y dirección que el fotón que estimuló al electrón.

### **2.3.2 / LED's**

Los LED's se basan sobre todo en la emisión espontanea. Cuando los huecos, que están en la banda de valencia, se combinan con los electrones de la banda de conducción, se produce la emisión de fotones cuya energía depende de la separación entre la banda de valencia y la banda de conducción. A este fenómeno se le denomina electroluminiscencia.



La selección de un material u otro depende de esta separación y de la diferencia de energía y por tanto de la longitud de onda a la que emite luz. Por ejemplo, mientras que el GaAs emite luz a 880nm, el InGaP emite luz a 670nm.

Un LED, es una unión  $pn$  con concentraciones adecuadas de material dopado- $n$  y de material dopado- $p$ .

Un LED emite luz en todas direcciones, pero en la práctica esto queda limitado por la construcción mecánica del diodo, la reflexión de la luz en el material metalizado y la absorción en el metal semiconductor.

La apertura numérica puede variar desde 0,9 para un LED de gran ángulo hasta 0,2. Aunque la apertura numérica de 0,2 es bastante pequeña, el área de emisión es grande comparada con la de un laser. La baja densidad de potencia resultante reduce enormemente la potencia que se puede acoplar a una fibra de índice gradual y hace casi imposible el acoplo a una fibra monomodo.

A continuación en la figura 2.2 podemos ver las diferencias entre los espectros de dos tipos de diodos LED:

- SLED (Surface light emitting diode)
- ELED (Edge light emitting diode)

Los ELED consiguen un espectro mucho más estrecho que los SLED, y por tanto logran mayor concentración de energía a costa de una mayor dificultad en su fabricación. La imagen se usó como explicación en la asignatura de Comunicaciones Ópticas.

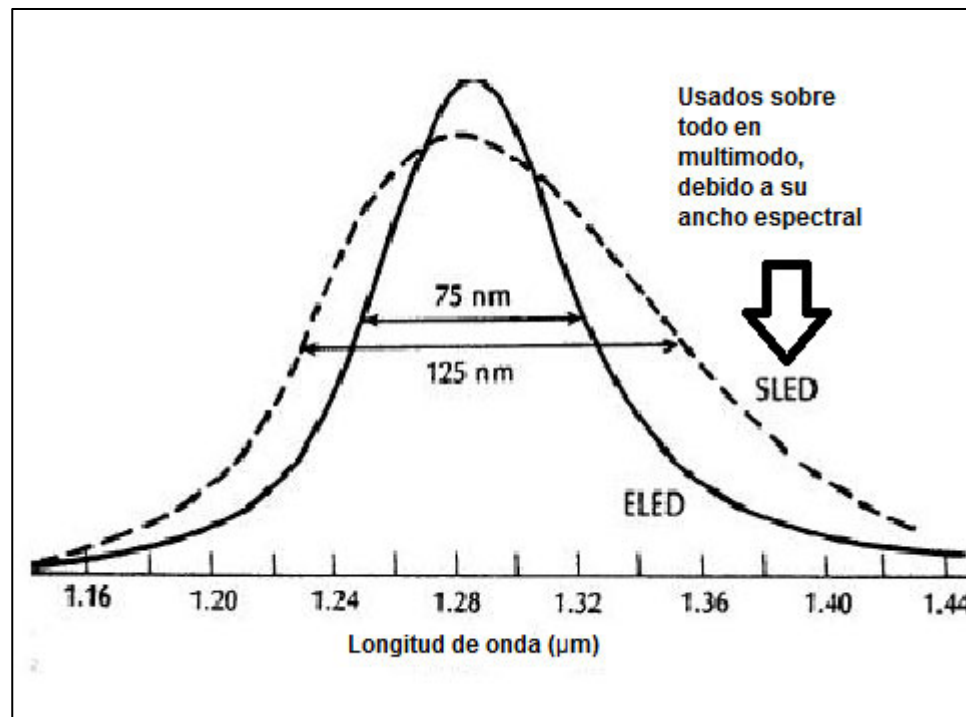


Figura 2.2 Espectro de dos tipos de diodo LED

### 2.3.3 / LASER

Los primeros láseres estaban formados por uniones *pn* de GaAs. Esta unión forma una guíaonda similar a un resonador de Fabry-Perot (Anexo 1). La generación de energía se produce por la recombinación de electrones y huecos en la zona de depleción. Gracias a que los láseres emiten de forma estimulada transmiten mucha más energía que los LED's y tienen un espectro mucho más estrecho (en forma de peine), a diferencia del de los LED's que es en forma de campana. Por ello los láseres son los utilizados para transmitir luz en fibras monomodo. En la siguiente figura, usada al igual que la anterior como explicación en la asignatura de Comunicaciones Ópticas, se muestra el espectro de un láser donde las líneas rojas discontinuas, representan las caídas a -3dB y la separación entre rayas espectrales vale alrededor de 2nm.

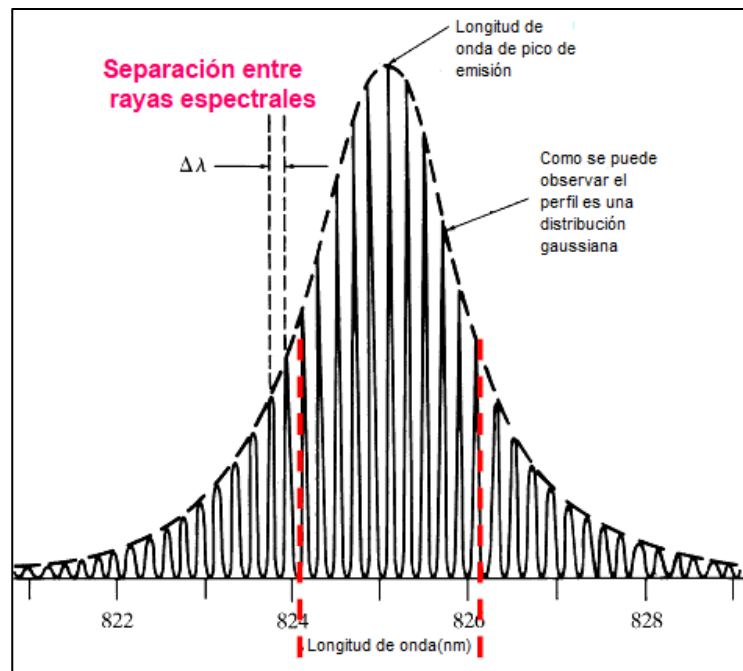


Figura 2.3 Espectro de un diodo LASER común

El proceso de generación de luz es similar al del LED. Las diferencias radican en el volumen de generación, más pequeño en los diodos láser, y en una alta concentración de portadores inyectados. Se consigue así una ganancia óptica alta y un espectro muy estrecho que da lugar a luz coherente. La pastilla láser suele tener una longitud de  $300\mu\text{m}$ , con dos caras cuidadosamente cortadas en ambos extremos a modo de espejos. El origen de la emisión de fotones es la recombinación directa electrón-hueco en la capa activa.

En el plano vertical, el confinamiento óptico se consigue revistiendo la capa activa con capas pasivas (de tipo  $p$  y de tipo  $n$ ). Estas capas poseen un intervalo entre bandas superior al de la capa activa, formando así una barrera que impide a la luz de la banda de conducción escapar mediante difusión. Así mismo, las capas pasivas tienen un índice de refracción inferior al de la capa activa, con lo que se forma una guía de ondas ópticas que confina la luz en el plano de la capa activa, al propagarse entre los espejos. Esta estructura da lugar a que la corriente en los laterales de la zona activa sea muy pequeña.

A partir de una cierta densidad de corriente en la zona activa, la ganancia óptica excede a las pérdidas y la emisión pasa de espontánea a estimulada. La corriente a la que se

produce el cambio se denomina umbral. Esta corriente es baja en láseres de heteroestructura, entre 50mA y 150mA.

## **2.4 / Detectores**

El fotodetector, es un componente crítico en cualquier sistema de comunicaciones por fibra óptica, pero muchas veces se tiene menos en cuenta concentrándonos en las mejoras de los transmisores laser y en las mismas fibras ópticas. Simplemente con cambiar de un tipo de fotodetector a otro se puede incrementar la capacidad de un sistema óptico en un orden de magnitud sin tocar ningún otro componente.

Aunque existen varios tipos de fotodetectores, usualmente sólo se consideran tres para la detección directa de señales digitales en comunicaciones ópticas:

- El fotoconductor
- El diodo PIN
- El fotodiodo de avalancha (APD)

La mayor parte de los sistemas instalados en el mundo utilizan fotodiodos PIN, muchos de ellos son de silicio y se usan en sistemas de longitudes de onda en primera ventana (800 y 900 nm) para comunicaciones a corta distancia. Al fin y al cabo los diodos PIN, con su gran ancho de banda y bajo ruido, son la promesa futura para conseguir una generación de detectores ópticos completamente integrados.

Básicamente, el detector es un dispositivo que convierte fotones en electrones, un receptor se compone de un detector y de los circuitos necesarios asociados que lo capaciten para funcionar en un sistema de comunicaciones ópticas, transformando señales de frecuencias ópticas a frecuencias inferiores, con la mínima adición de ruido indeseable y con un ancho de banda suficiente para no distorsionar la información contenida en la señal (analógica o digital).

### **2.4.1 / Diodo PIN**

El fotodiodo PIN es el detector más importante utilizado en los sistemas de comunicación óptica. Es relativamente fácil de fabricar, altamente fiable, tiene bajo ruido además de ser compatible con circuitos amplificadores de baja tensión. Unas zonas  $p$  y  $n$  altamente conductivas junto a otra intrínseca poco conductiva, caracterizan al diodo PIN. Los fotones

entran a la zona intrínseca generando pares electrón-hueco. El diodo se polariza inversamente con el fin de que las cargas generadas en la zona intrínseca sean aceleradas por el campo eléctrico presente.

Una típica estructura  $p-i-n$  planar tiene, como material absorbente de luz, a un compuesto de InGaAs. La región de absorción es fina, siendo, generalmente, un material tipo  $n$  sobre un sustrato tipo  $n$  de indio fosforoso. La superficie superior está recubierta de un fino aislante, o capa pasiva, para proteger la superficie y reducir la recombinación de electrones y huecos en dicha superficie.

Cuando un fotón entra en la zona de deplexión, es absorbido y genera un par electrón-hueco, los cuales son dirigidos hacia los electrodos opuestos. Allí se recogen y aparecen como corriente en el circuito exterior.

Debido a que no existe mecanismo de ganancia en un fotodiodo PIN, la máxima eficiencia del detector es la unidad y el producto ganancia por ancho de banda coincide con esta última.

La principal fuente de ruido en un fotodiodo  $p-i-n$  es el ruido de granalla (shot noise), producido en la zona de deplexión de la unión  $p-n$  inversamente polarizada, generado por el proceso estadístico de los electrones atravesando la unión  $p-n$ .

## **2.4.2 / Fotodiodo de avalancha (APD)**

Los APD son similares a los diodos PIN en cuanto a que trabajan polarizados en inversa, en ausencia de grandes corrientes de oscuridad, se denominan así porque hay corriente sin inyectar nada.

A diferencia de los diodos PIN los APD operan a tensiones inversas lo suficientemente elevadas como para que cuando los portadores cruzan el campo eléctrico, colisionen con otros átomos que componen la estructura cristalina del semiconductor. Las colisiones ionizan los átomos, produciéndose nuevos pares electrón-hueco. Esta ionización por impacto nos determina la ganancia interna del dispositivo o ganancia de avalancha.

### **2.4.2.1 / Proceso de avalancha**

Con polarización directa (es decir, la región  $p$  positiva y la región  $n$  negativa), el diodo está preparado para conducir corriente limitada por la resistencia del dispositivo. En polarización

inversa, la unión  $p-n$  forma una barrera y sólo la puede atravesar una corriente muy pequeña, normalmente causada por generación térmica (ya que los átomos de la red cristalina están en constante vibración) y por la separación debida al campo eléctrico que existe en la región de depleción. Esta corriente se denomina corriente de oscuridad, puesto que existe incluso en ausencia de luz incidente: está presente en todos los diodos en mayor o menor grado y suele ser característica del material usado en la construcción del diodo.

Si la polarización es negativa se aumenta la corriente de oscuridad, la cual crece también gradualmente al ensancharse la región de depleción. Con polarización inversa suficientemente grande, el campo eléctrico en la zona  $p-n$  puede hacerse tan intenso que acelere los pares electrón-hueco generados térmicamente, con energía suficiente como para crear más de estos pares por colisiones con los átomos de la estructura. Estos pares, ionizados por impacto, son a su vez acelerados, junto con los portadores de carga fotogenerados primariamente, para colisionar con más átomos de la red y producir nuevos portadores de carga. De esta manera se puede amplificar la corriente primaria, aumentando su ganancia con la polarización. Finalmente, se alcanza un voltaje para el cual la ganancia de multiplicación de la corriente de oscuridad se aproxima a infinito. A este valor se lo denomina tensión de ruptura del diodo.

Cuando se ilumina el diodo, se producen muchos más pares electrón-hueco, generándose en él una fotocorriente. A una polarización suficientemente baja (alrededor del 10% de la tensión de ruptura) se puede suponer que no hay ganancia de avalancha de la fotocorriente. Es decir, la fotocorriente es la corriente total generada en el diodo menos la corriente de oscuridad correspondiente a esa tensión. Para un voltaje mayor (90% de la tensión de ruptura), se produce una ganancia finita, tanto de la fotocorriente como de la corriente de oscuridad. La ganancia neta es entonces la fotocorriente a esa tensión dividida por la fotocorriente sin amplificar. La máxima ganancia se alcanza justo antes de la tensión de ruptura; sin embargo, el factor de ruido es también máximo en este punto. La ganancia óptima cuando se emplea un APD, en un receptor óptico corresponde a un valor inferior al máximo, en el cual el ruido después de la multiplicación coincide con el ruido del amplificador.

El factor de multiplicación depende fuertemente del voltaje inverso aplicado y de la temperatura, lo que hace que resulte complicado alcanzar una ganancia estable. Un

compromiso típico entre ganancia y estabilidad es un valor del factor de multiplicación entre 50 y 150. La corriente de oscuridad también es muy sensible a la temperatura. En los diodos de Silicio, la corriente se dobla cada 8° C, en los de Germanio cada 9° C. A 25° C la corriente de oscuridad típica de un APD de silicio con 0,1mm de diámetro de área activa es de 1nA a 10nA, para un valor de factor de multiplicación de 100.



## 2.5 / Parámetros importantes

### 2.5.1 / Apertura numérica

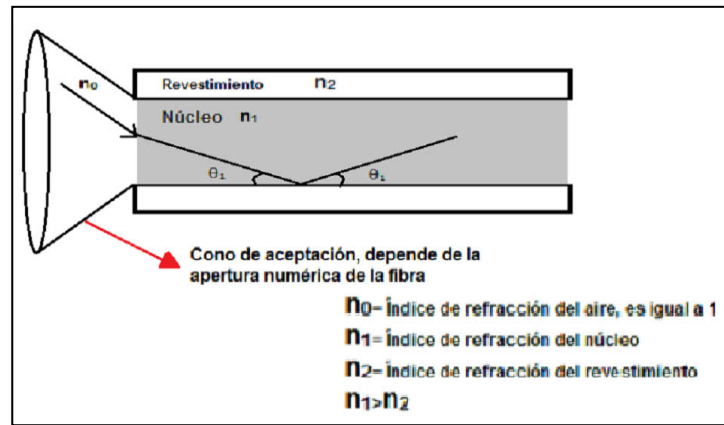


Figura 2.4 Cono de aceptación de una fibra óptica

Una de las características más destacadas de la fibra óptica es su apertura numérica (AN), que es la capacidad que tiene la fibra para capturar luz que incide sobre ella. Cada fibra óptica posee un “cono” de aceptación mostrado en la figura 2.4. Si un rayo incide en la fibra con un ángulo “válido” (dentro de los posibles valores que nos da el “cono”), se propaga por la fibra, sin embargo, si incide con cualquier otro ángulo que no cumpla las condiciones del “cono” de aceptación se atenuará rápidamente. Realizando el desarrollo matemático y simplificando obtenemos que la AN es:

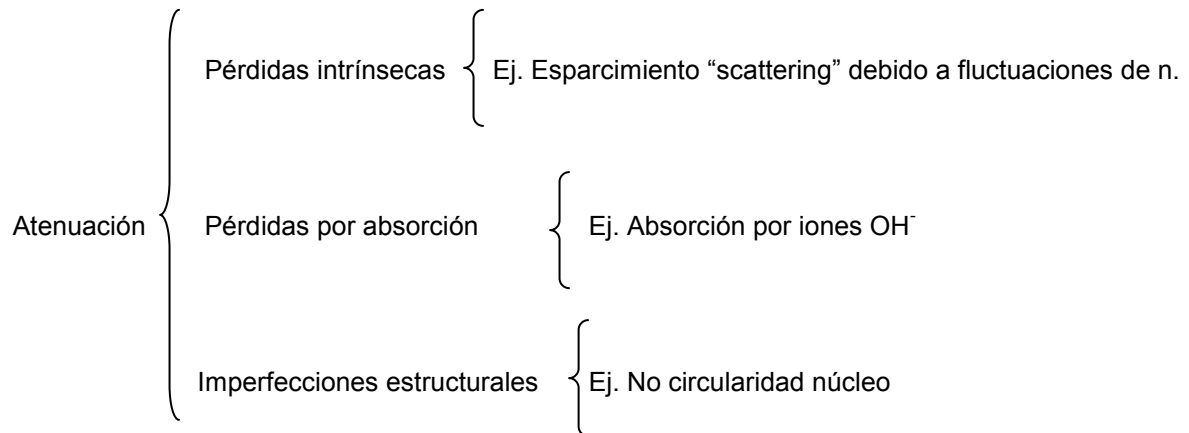
(2.6)

$$AN = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Siendo  $n_1$  el índice de refracción del núcleo y  $n_2$  el de la revestimiento.

### 2.5.2 / Atenuación

El tipo de material utilizado para desarrollar la fibra óptica suele ser el que nos proporciona un mínimo de atenuación. Para la transmisión de datos el mejor material actualmente es la sílice. A continuación se muestran los principales factores que afectan a la atenuación:



Antes de proseguir debemos definir el término ventana. Las fibras ópticas varían su atenuación en función de la longitud de onda. Las ventanas son las longitudes de onda para las cuales la fibra óptica posee una baja atenuación y hace posible la transmisión sin una excesiva atenuación.

Las atenuaciones más comunes para las ventanas de 800nm, 1300nm y 1550nm son 2-3 dB/km, 0.5 dB/km y 0.2 dB/km respectivamente. Parte de estas pérdidas están relacionadas con factores intrínsecos del tipo de material con que esté fabricada la fibra óptica, otros muchos son extrínsecos y dependen (como la atenuación por iones  $\text{OH}^-$ ) de la fabricación de la fibra.

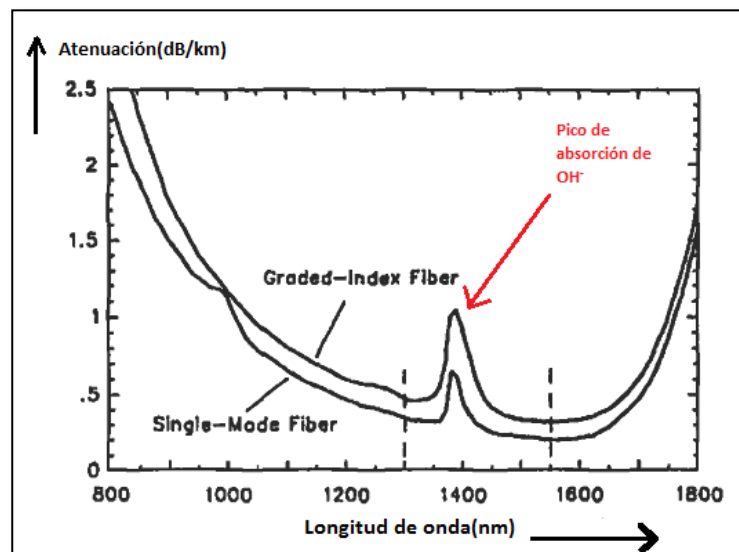


Figura 2.5 Variación de la atenuación en una fibra en función de la longitud de onda. Imagen obtenida de Ref. [2], p.40

En la figura 2.5 se puede apreciar como varía la atenuación de una fibra óptica en función de la longitud de onda. El pico de atenuación que se puede observar en torno a 1375nm es debido a los iones  $\text{OH}^-$ , que durante la fabricación de la fibra pueden quedar adheridos a la misma siendo muy difícil su completa eliminación. Actualmente, se desarrollan fibras que eliminan casi totalmente este elevado pico de atenuación, pudiendo transmitir a estas longitudes de onda sin sufrir una gran atenuación.

### 2.5.3 / Dispersión

La dispersión es debida a que las diferentes longitudes de onda tienen diferentes constantes de propagación, viajando por ello a diferentes velocidades por la fibra óptica, obteniéndose al final de la misma un pulso de mayor longitud que el que inyecta el diodo láser. Desde el punto de vista de un sistema de comunicaciones, la dispersión es un factor muy importante dado que el aumento de la misma hace aumentar la tasa de error de bit, haciéndose cada vez más difícil una correcta transmisión de la información.

Los parámetros más importantes que contribuyen a aumentar la dispersión son:

- Dispersión por guía onda.
- Dispersión material.
- Dispersión modal

Las dispersiones material y por guíaonda, se denominan en algunos casos dispersión cromática y se miden en  $\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ . Su valor es el siguiente:

(2.7)

$$D_{chr} = -\frac{1}{L} \frac{dt_g}{d\lambda}$$

Donde:

$L$  = es la longitud de la fibra.

$t_g$  = es el tiempo necesario para que se propague la señal por la fibra (el subíndice  $g$  se refiere a la velocidad de grupo).

Cuando un pulso se propaga por un medio dispersivo éste se propaga según su velocidad de grupo,

(2.8)

$$V_g = \frac{d\omega}{d\beta}$$

La forma en la que varia la fase es,

(2.9)

$$V_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{c}{n}$$

La dispersión queda completamente definida por la velocidad de grupo, variando con la longitud de onda con la que estemos trabajando. Para poder apreciarlo mejor, fijémonos en la figura 2.6.

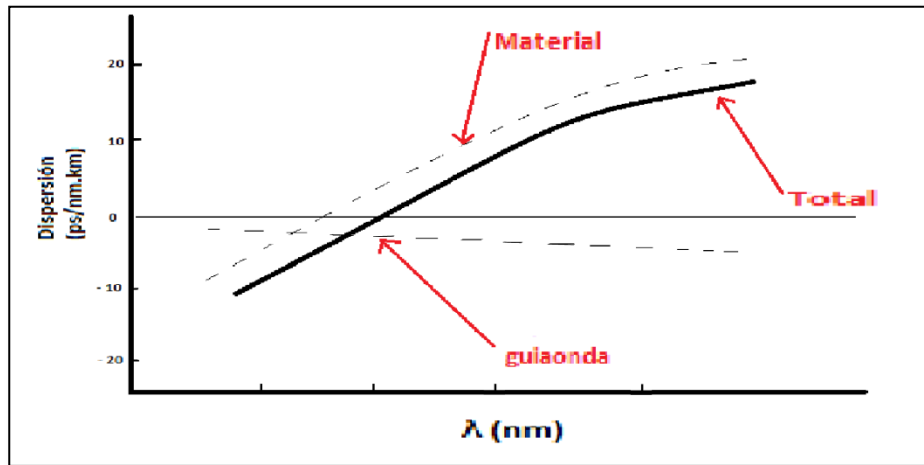


Figura 2.6 Variación de la dispersión en función de la longitud de onda

Las variaciones de la dispersión mostradas en la figura 2.6 anterior, son un ejemplo para fibra monomodo, ya que de lo contrario deberíamos considerar la dispersión modal, que en fibras multimodo es la que tiene mayor importancia. Como se puede observar la dispersión material aumenta con la longitud de onda y la dispersión por guíaonda disminuye. Gracias a esto, al sumar sus efectos, podemos conseguir que la dispersión total para una determinada longitud de onda sea nula.

#### **2.5.4 / Ruido**

En principio, puede definirse como ruido a cualquier señal indeseable en un sistema de telecomunicaciones. Sin embargo, tal definición resultaría ambigua, ya que permite interpretar como ruido a fenómenos tales como intermodulación, interferencias, etc. que, en gran medida son controlables mediante un diseño adecuado del sistema y los circuitos que lo conforman.

El ruido es un fenómeno natural, inevitable y generalmente incontrolable de carácter aleatorio. En otras palabras, el ruido siempre estará presente en cualquier sistema de comunicaciones y contribuirá, en mayor o menor medida, al deterioro de la señal a la salida del receptor, además de constituir el principal factor limitante en su detección. De acuerdo con lo anterior, el ruido es efectivamente una “señal” indeseable, aunque el uso del término señal es discutible, ya que el ruido no representa información excepto en casos muy aislados. El ruido, la distorsión y la interferencia juegan un papel muy importante en los sistemas de comunicación, ya que limitan la calidad de la señal de información, si bien su naturaleza es completamente diferente.

##### **2.5.4.1 / Ruido térmico**

Es la causa de ruido más importante en los circuitos eléctricos y, por consecuencia, está presente en todos los componentes de los sistemas de comunicaciones que incluyen circuitos eléctricos o electrónicos, particularmente en los receptores en que los niveles de señal pueden ser comparables a los de ruido térmico generado en los circuitos del propio receptor. Su origen es el movimiento aleatorio de los electrones libres en los conductores y semiconductores. Este movimiento es dependiente de la temperatura, de modo que a mayor temperatura mayor será el ruido térmico del sistema, pudiendo llegar a necesitarse refrigeradores para no poner en peligro el correcto funcionamiento del sistema. Otra forma de reducir el ruido térmico es colocando adecuadamente filtros en los circuitos que lo necesiten.

La densidad espectral del ruido térmico es uniforme en el espectro de frecuencias, es decir que sus componentes espectrales abarcan desde 0 Hz (c.c.), hasta frecuencias del orden de  $10^{13}$  Hz, en la región del ultravioleta con la misma amplitud, de aquí que a este tipo de

ruido se le designa como ruido blanco por analogía con la luz blanca cuyo espectro es uniforme en el rango de frecuencias visibles, o en otras palabras, contiene por igual componentes de todos los colores del espectro visible.

La densidad espectral de ruido depende de la temperatura y está dada por:

(2.10)

$$N_0 = KT \text{ (W/Hz)}$$

Donde:

T = Temperatura en Kelvins = Temperatura ambiente en °C + 273.

k = Constante de Boltzmann =  $1.38 \times 10^{-23}$  W/K·Hz.

Por consecuencia, en un ancho de banda B, la potencia de ruido es:

(2.11)

$$N = N_0 B = KTB \text{ (W)}$$

#### 2.5.4.2 / Ruido de granalla

La agitación térmica no es la única fuente de ruido en los circuitos electrónicos. El ruido de granalla (shot noise) juega un papel de similar importancia al ruido térmico y es causado por las variaciones aleatorias en los tiempos de llegada de los portadores de carga (electrones o huecos) a los electrodos de salida en todos los dispositivos activos, tales como válvulas, transistores, etc. y aparece como una corriente variable de ruido, superpuesta a la corriente de señal de salida.

El ruido de granalla se produce por la corriente de oscuridad  $I_0$  en los fotodiodos PIN, dado por

(2.12)

$$N_s = 2 \left( \frac{hf}{r} \right) I_s B + 2 \left( \frac{hf}{r} \right) G^{2(1+a)} I_B B$$

Donde:

$I_S$  = Corriente no implicada en el proceso de avalancha

$I_B$  = Corriente de oscuridad complementada cuando hay avalancha

Como se puede observar el ruido de granalla aumenta cuanto mayor es la suma de corriente que circula por el fotodiodo.

## **2.6 / Empalmes**

El diámetro del núcleo de la fibra óptica es muy pequeño, tanto que una fibra óptica con recubrimiento añadido tiene un tamaño similar a un cabello humano. Por ello cualquier irregularidad, por el motivo que sea, como un empalme puede suponer una pérdida significativa de potencia. Para conseguir la máxima transferencia de potencia de una fibra a otra, deben estar minuciosamente colocadas y estar lo más cerca posible para que entre los extremos de las dos fibras haya mínima cantidad de aire.

Un empalme puede parecer algo trivial, pero ya podemos suponer, por lo dicho en el párrafo anterior que no va a ser tan sencillo. La forma en la que viaja la luz por una fibra óptica no es igual a la que viaja la electricidad por un cable, la luz es una onda guiada por el interior de la fibra por lo que cualquier imperfección conlleva grandes pérdidas.

A pesar de tantos inconvenientes hay varias formas de empalmar dos fibras. Estas son:

- Empalme por fusión.
- Uso de materiales de índice refracción epoxi-coincidentes.
- Con conectores mecánicos de diferentes tipos.

Lo más importante en los tres métodos es que las fibras queden enfrentadas perfectamente. Sin embargo, somos capaces de alinear las fibras y no de alinear los núcleos, que es verdaderamente lo importante ya que es por donde viaja la luz fundamentalmente. El núcleo no es siempre el centro de la fibra. Los fabricantes tratan de situar el núcleo en el centro pero siempre hay un error denominado concentricidad, habiendo siempre pérdidas debidas a este fenómeno.

### **2.6.1 / Empalmes por fusión**

La unión de dos fibras es de alguna manera una soldadura. Los extremos de las fibras a unir se cortan, se limpian de posibles impurezas y por último se unen y funden por el calor; dicho sea de paso, para fibras de sílice se necesitan altas temperaturas para conseguir la fusión. La atenuación media por empalme es de 0.1 dB, que es un buen valor, sin embargo, debemos darnos cuenta de que 0.1 dB en una fibra de tan solo 0.5 km es demasiado.



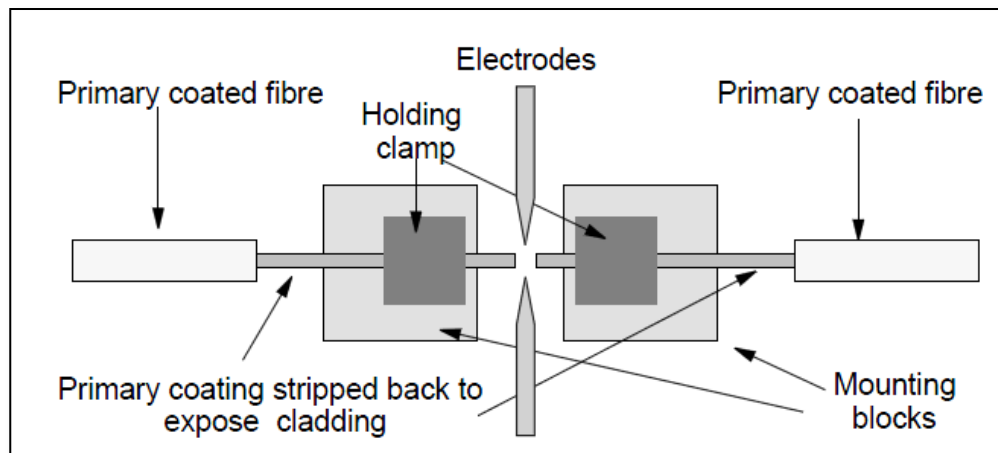


Figura 2.7 Procedimiento de empalme en fibra óptica, Ref. [1].p.276

En la imagen anterior se observa la forma de unión de dos fibras por fusión, cuyo método va a ser explicado en las siguientes líneas:

- 1) En primer lugar, cortamos parte del revestimiento de la fibra y pelamos la misma hasta que conseguimos que la fibra en sí “esté al aire”.
- 2) A continuación, los extremos de las fibras se colocan el uno del otro a pocos mm, sujetando ambos para que no se muevan durante la soldadura.
- 3) Las fibras se alinean una con la otra y se aproximan entre sí.
- 4) Cuando la alineación es correcta, entonces los dos electrodos entran en funcionamiento y se procede a la fusión de las dos fibras.

### 2.6.2 / Uso de materiales de índice de refracción epoxi-coincidentes

En esta técnica de unión de fibras, los extremos de las mismas son cortados y pulidos y alineados correctamente igual que en el caso anterior, pero su unión se realiza gracias a una epoxi-resina. En este caso, la unión de las fibras se denomina “mecánica” ya que no alinea las fibras teniendo en cuenta el lugar en el que se encuentra el núcleo. Hay muchas maneras de alinear la parte exterior de dos fibras ópticas:

- Un método común es usar un tubo de vidrio en el que cada fibra se introduce por un extremo. Una pequeña cantidad de la epoxi-resina se coloca en el extremo de una

de las fibras antes de introducirla al tubo. Suele haber un pequeño agujero en el centro del tubo, de manera que un exceso de epoxi-resina pueda escapar al exterior.

- Hay muchos otros métodos de conseguir una correcta alineación de las fibras ópticas, entre ellas ranuras y varillas de alineación.

No es necesario decir que esta técnica de empalme de fibras es la más barata, pero la calidad no es tan elevada. La calidad de la unión depende de:

- La concentricidad de la fibra.
- El “acabado” de la parte exterior de la fibra.
- La circularidad de la parte exterior de la fibra.
- La precisión del método de unión.

A pesar de la facilidad de la unión, hay un posible pequeño inconveniente, (se dice posible ya que no es seguro que se produzca). Se trata de la estabilidad de la epoxi-resina a lo largo del tiempo y su pérdida de cualidades pudiendo generar dispersiones en el tiempo si esta se rompiera. Por ello, actualmente se está desarrollando un nuevo tipo de epoxi-resina que mejora este posible inconveniente.

### **2.6.3 / Pérdidas por empalmes**

Las pérdidas por empalmes se clasifican fundamentalmente en dos grupos:

- 1) Pérdidas extrínsecas, son aquellas que se refieren solo a las pérdidas del empalme y no al tipo de fibra o fabricación.
- 2) Pérdidas intrínsecas, son aquellas inherentes al tipo de fibra o fabricación de la misma.

### 2.6.3.1 / Pérdidas extrínsecas

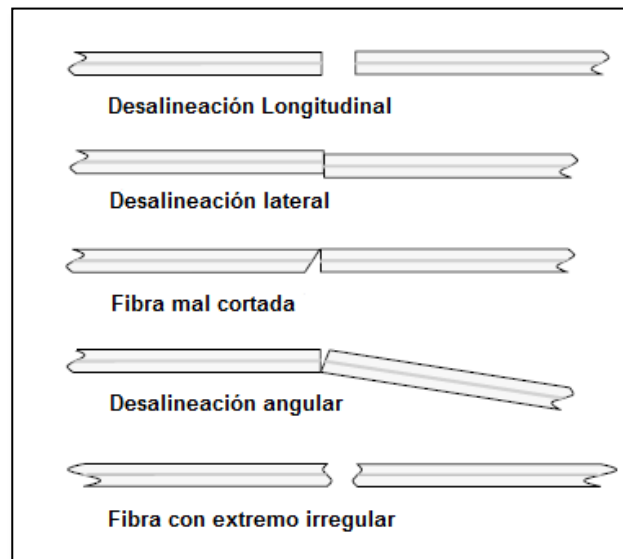


Figura 2.8 Posibles errores al empalmar fibras, Ref. [1] p.280

En la figura 2.8 se pueden apreciar los principales problemas de un mal empalme. Las pérdidas más comunes producidas por las anteriores irregularidades a la hora de realizar un empalme son los siguientes:

- 1) Desalineación longitudinal: Tiene dos inconvenientes:
  - Posibilidad de pérdida de luz hacia el exterior.
  - “Creación” de un interferómetro de Fabry-Perot entre los dos extremos pudiendo reflejarse desde el 0 al 100% de la potencia.
- 2) Desalineación lateral: Es uno de los grandes problemas a la hora de realizar un empalme. Un desplazamiento de únicamente una micra provoca pérdidas de 0.2 dB (en fibra monomodo).
- 3) Fibra mal cortada: Se debe a un corte irregular y por ello la imposibilidad de unir las fibras ópticas correctamente.

- 4) Desalineación angular: Este inconveniente es mucho más perjudicial en fibras monomodo, puesto que su AN es mucho más pequeña. Una desalineación de  $2^\circ$  se traduce en casi 1 dB de atenuación.
- 5) Fibra con extremo irregular: Las pérdidas de esta irregularidad son difíciles de predecir. El principal problema es parecido al de la fibra mal cortada, es decir, la imposibilidad para unir correctamente las dos fibras.

### 2.6.3.2 / Pérdidas intrínsecas

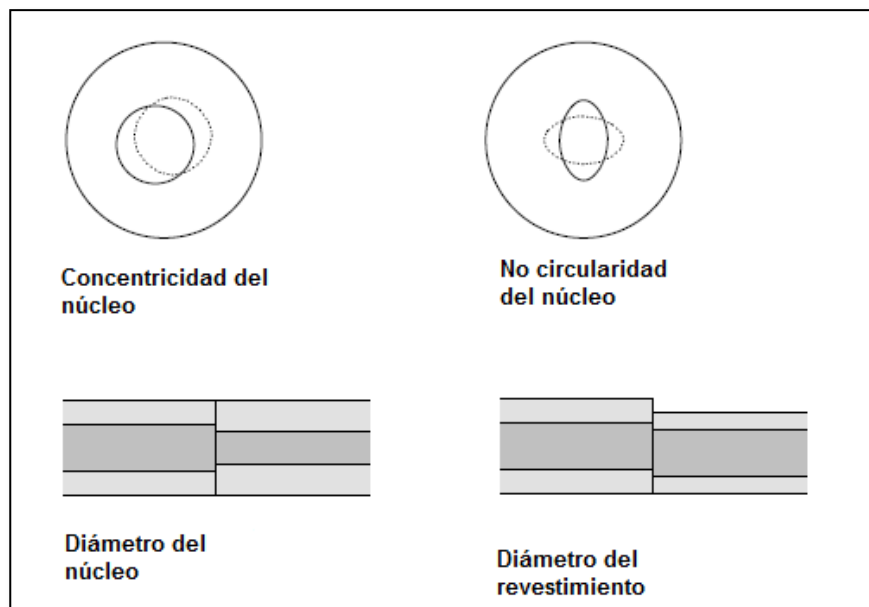


Figura 2.9 Esquema de algunas de las pérdidas intrínsecas en fibras ópticas, Ref. [1], p.281

Las pérdidas intrínsecas son aquellas que dependen del tipo de fibra óptica y de la manera en que la misma está fabricada. En la imagen anterior se pueden apreciar algunos ejemplos. A continuación se explican con más detalle:

- 1) Errores de concentricidad en el núcleo: Como se ha explicado anteriormente, esta es una de las causas de mayores pérdidas a la hora de realizar empalmes. Se debe a que el núcleo de la fibra no está exactamente en el centro de la misma, por lo que al realizar los empalmes los núcleos de las fibras no quedan perfectamente alineados.

- 2) No circularidad del núcleo: No importa la precisión con la que se realice el núcleo de la fibra, siempre tendrá una cierta desviación y no será perfectamente circular. Cuando se corta una fibra, para después empalmarla el núcleo puede sufrir alteraciones. Esto no es muy importante en fibras multimodo, sin embargo, en fibras monomodo se produce el fenómeno de birrefringencia (anexo 2).
- 3) Diámetro del núcleo: Los diámetros de dos fibras que se van a empalmar nunca son exactamente iguales, por lo que a pesar de que estén perfectamente alineados siempre se escapa parte de la potencia. Un dato curioso es que en fibras perfectamente alineadas, pasa esto si la siguiente fibra tiene un núcleo más pequeño, ya que si este fuera más grande no sufriría pérdida alguna de potencia.
- 4) Diámetro del revestimiento: Como ya hemos indicado anteriormente, no sabemos nunca con certeza donde está el núcleo exactamente, por lo que las fibras deben alinearse exteriormente. Por lo que si el revestimiento de las dos fibras que componen el empalme es diferente los núcleos no podrán estar alineados.

Además de estos problemas podemos destacar lo que ocurre en fibras multimodo cuando se unen dos fibras de distinta apertura numérica. Dado que su cono de aceptación es diferente es posible que algunos modos no atraviesen el empalme.

## **2.7 / Conectores**

En muchas situaciones es necesario poder cambiar las conexiones entre fibras rápida y fácilmente, con este propósito utilizamos los conectores. Los conectores sujetan a la fibra en la posición correcta y mediante una suave presión se consigue una buena conexión. Por supuesto esto depende de la precisión con la que se haya fabricado el conector. Debido al pequeño tamaño de la fibra óptica, estos conectores necesitan en su fabricación un extra de precisión ya que si no las pérdidas serían muy elevadas. No hace falta decir que la fabricación de estos conectores es muy complicada y costosa. Algunos de estos conectores vienen ya unidos a la fibra óptica, consiguiéndose de esta manera una mayor precisión que los conectores que se pueden montar y desmontar. Antes de utilizar un conector debemos asegurarnos de que está libre de suciedad, ya que la más mínima mota de polvo puede obstruir la fibra (núcleo de la fibra monomodo  $\approx 8\mu\text{m}$ ). Los conectores suelen usarse sobre todo en las centrales de fibra óptica en las que frecuentemente es necesario realizar cambios rápidamente.

En la actualidad, los conectores poseen una alta precisión llegando a las 0.2 dB de pérdidas, sin embargo, la mayoría de los fabricantes todavía nos sugieren en sus hojas de características una pérdida de alrededor de 1 dB por conector. Un buen conector debe cumplir las siguientes características:

- Pérdidas de inserción bajas
- Pérdidas de retorno bajas
- Facilidad de instalación
- Fiabilidad

A continuación, se puede observar una tabla (figura 2.10) con distintos tipos de conectores y sus características típicas. En la primera columna está el nombre del conector, en la segunda aparecen las pérdidas del conector para fibras multimodo, en la tercera de igual manera que para la segunda columna solo que para fibras monomodo y en la última columna se indican las pérdidas de retorno de conector. Las pérdidas de retorno son la

diferencia entre la potencia que se transmite y la potencia que se refleja, en este caso al pasar por el conector.

Tipo de Conector	Pérdidas de inserción (Fibra monomodo)	Pérdidas de inserción (Fibra multimodo)	Pérdidas de retorno
ST	0,25 dB	0,2 dB	40 dB
SC	0,25 dB	0,2 dB	40 dB
SMA	1,5 dB		
FSD	0,5 dB		
FC	0,25 dB	0,2 dB	40 dB
D4	0,25 dB	0,2 dB	35 dB
DIN	0,25 dB	0,2 dB	40 dB

Figura 2.10 Conectores comunes, considerando sus pérdidas de inserción y de retorno

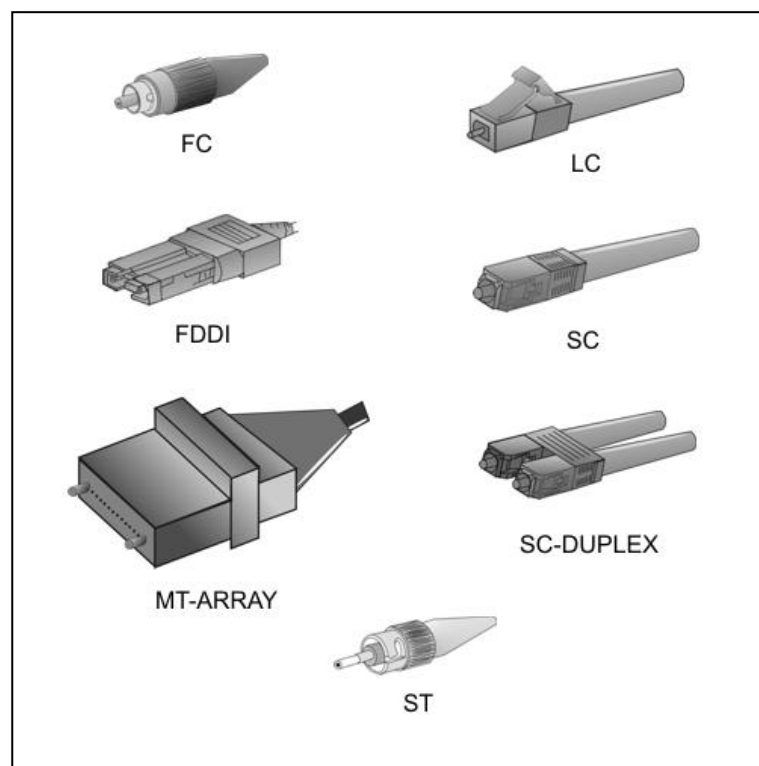


Figura 2.11 Forma de varios conectores de fibra óptica

### **3 / Reflectometría óptica en el dominio del tiempo (OTDR)**

#### **Sumario**

- Principios básicos
- Análisis de la señal retrodispersada



### 3.1 / Principios básicos

El OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) es un instrumento que envía un pulso de luz de corta duración al dispositivo bajo prueba y mide, en función del tiempo, la señal óptica retrodispersada. A medida que el pulso óptico se propaga a lo largo de la fibra, parte de su energía es retro-reflejada (reflejada en la dirección opuesta a la del haz incidente) debido en gran medida a la dispersión de Rayleigh y a las reflexiones de Fresnel. Las características del haz retrodispersado permiten determinar la magnitud y localización de eventuales zonas de pérdidas a lo largo de la fibra.

La figura 3.1 muestra un diagrama de bloques de un OTDR genérico. Se utiliza un generador de pulsos activado por la unidad de procesamiento de señales para modular la intensidad de un láser. La señal de prueba convencional es un pulso cuadrado con duración de entre 5ns y 10µs que depende de la resolución espacial y la sensibilidad requerida para la medición. Está equipado con uno o dos láseres de diferentes longitudes de onda (típicamente de 1310 nm y 1550 nm) que combina en un solo haz mediante un acoplador para la multicanalización por división en longitud de onda.

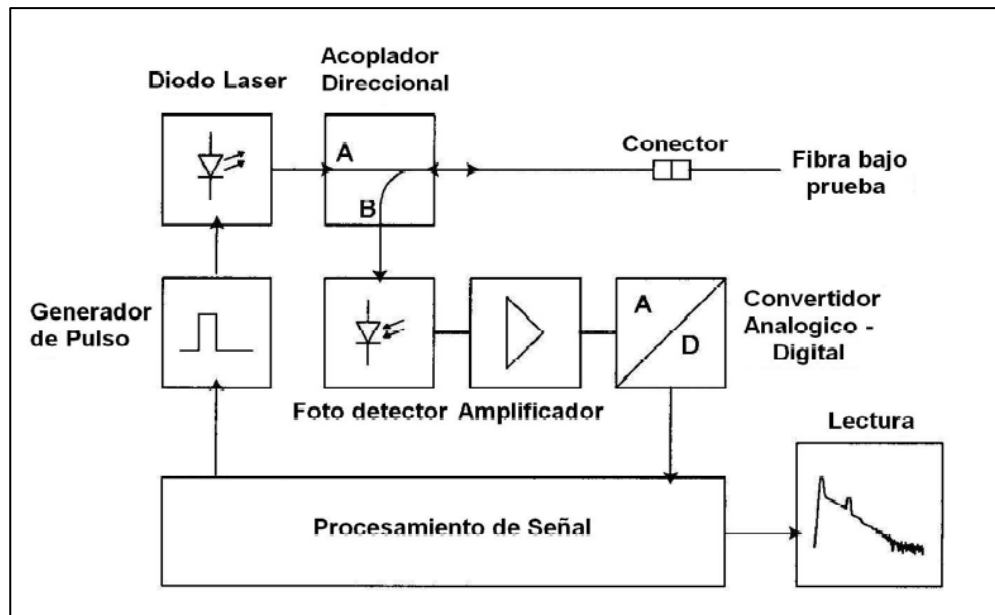


Figura 3.1 Diagrama de bloques de un OTDR. Ref. [7] p.18

Para prevenir la saturación del láser por la señal reflejada, la fuente es inyectada a la fibra bajo prueba mediante un acoplador direccional con suficiente aislamiento entre los puertos

A y B. El tipo de acoplador más común es el de tipo de fusión a 3 dB con baja sensibilidad en la polaridad y una razón de separación cercana al 50% para las longitudes de onda de interés. Así, las pérdidas por el viaje de la fuente al receptor serán de 6 dB como mínimo. La señal de regreso es guiada por el acoplador direccional al fotodetector que puede ser un diodo PIN o un foto-diodo de avalancha (APD) y que actúa como una fuente de corriente para un amplificador de trans-impedancia de bajo ruido y con alta linealidad.

Esto requiere que el receptor tenga un alto alcance dinámico junto con una alta sensibilidad. Un convertidor analógico / digital (ADC) forma la interfaz para el mundo digital en donde los datos medidos son procesados y se calculan los parámetros de la fibra. El objetivo principal del medidor OTDR es determinar la respuesta al impulso de la retrodispersión de la fibra bajo prueba. Los pulsos del OTDR se aproximan a un impulso Delta de Dirac y la señal retrodispersada medida, una versión suavizada de la respuesta al impulso.

La escala logarítmica vertical representa el nivel de la señal reflejada en dB, vista en la figura 3.1. El eje horizontal corresponde a la distancia entre el instrumento y un punto determinado de la fibra bajo prueba, la cual depende linealmente ( $10 \mu\text{s}/\text{km}$  para la fibra de vidrio) del tiempo que tarda el OTDR en detectar la señal retrodispersada en ese punto a partir del momento de la emisión del pulso de excitación.

Comúnmente, la curva de respuesta exhibe tres formas características: la línea recta con una pendiente, causada por la distribución de la retrodispersión de Rayleigh; los picos positivos causados por reflexiones debidas a conectores y, finalmente, un escalón que puede ser negativo dependiendo de las propiedades físicas de la fibra.

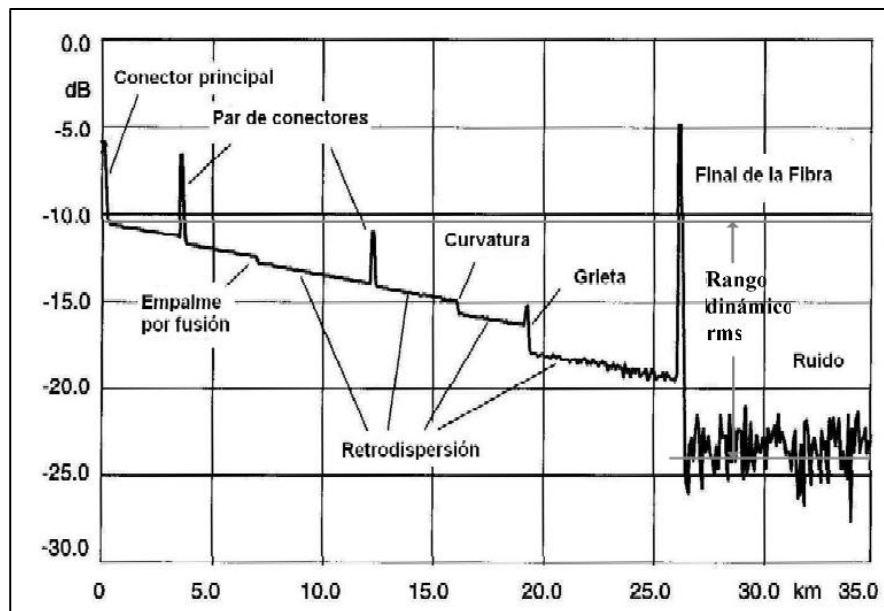


Figura 3.2 Curva típica de un OTDR. Ref. [7] p.20

El primer evento que se puede observar en la lectura del OTDR es una reflexión del conector principal que acompaña al OTDR en la realización de la prueba de la fibra. Este evento indeseable puede ser minimizado mediante limpieza en las conexiones y el empleo de conectores de elevada calidad.

Hay eventos no debidos a reflexiones, que muestran pérdidas puras, tales como las curvaturas y los empalmes por fusión. La existencia de reflexiones, depende de las condiciones de la superficie de la fibra y de las conexiones entre dos segmentos por ejemplo empalmes mecánicos y conectores. Una transición vidrio-aire, puede provocar reflexiones de hasta un 4% de la potencia óptica incidente.

También, dentro de la lectura se pueden observar otros dos parámetros importantes: rango dinámico y rango medido. El primero se define como la diferencia entre el nivel inicial de retrodispersión y el nivel de ruido después de 3 minutos de lectura, expresado en dB por pérdida unidireccional de la fibra. El nivel de ruido puede ser definido como el 98% nivel de ruido pico. El rango medido es la máxima atenuación que puede alcanzar el OTDR y un evento para el cual el OTDR todavía puede alcanzar a medir exactamente el

acontecimiento. Comúnmente se toma como referencia de un evento un empalme con su atenuación conocida.

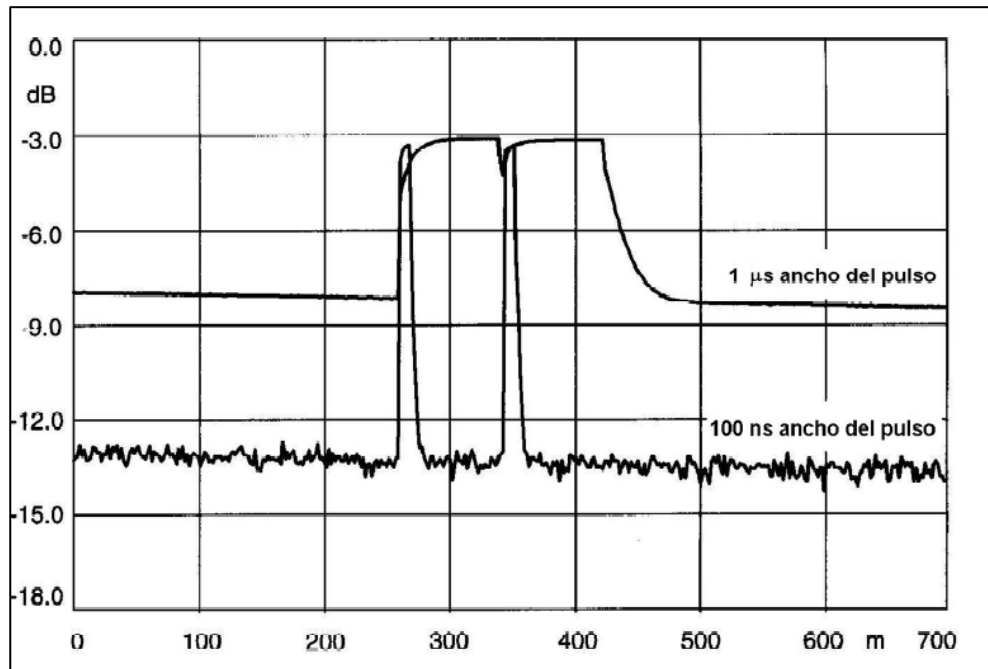


Figura 3.3 Diferencia en resolución y SNR causado por diferentes anchos de pulsos. Ref. [7] p.21

Una limitación fundamental de cualquier OTDR es el balance entre rango dinámico y resolución. La resolución de cualquier OTDR está limitada por la respuesta del receptor y la duración de la señal de prueba.

En la figura 3.3 se muestran las respuestas de una fibra con dos eventos reflexivos separados por una distancia de cien metros a dos pulsos de excitación, uno de 1  $\mu$ s y otro de 100 ns de duración respectivamente. El pulso de 1  $\mu$ s mejora la sensibilidad pero su resolución espacial (es decir, su capacidad para distinguir dos eventos adyacentes) es baja. Con un pulso de 100 ns, tenemos una resolución espacial más elevada (por lo que se pueden distinguir sin problema los dos eventos), un mayor alcance de medición más alto (por su baja reducción en la relación señal a ruido), pero una baja sensibilidad.

### 3.2 / Análisis de la señal retrodispersada

Podemos constatar que, en ausencia de perturbaciones, la potencia de la luz que se propaga a través de una fibra exhibe un decremento exponencial con la distancia. La potencia transmitida en función de la distancia  $z$  está dada por:

(3.1)

$$P(z) = P_0 e^{-\alpha z}$$

En donde  $P_0$  representa la potencia de la luz incidente y  $\alpha$  es el coeficiente de atenuación [ $\text{km}^{-1}$ ].

Para sistemas con pérdidas, en general es más conveniente utilizar un coeficiente de atenuación  $\alpha_{\text{db}}$  con unidades en dB/km.

De una manera simplificada, podemos considerar que el coeficiente total de atenuación  $\alpha$ , está compuesto por un coeficiente de absorción  $\alpha_a$  y un coeficiente de dispersión  $\alpha_s$ :

(3.2)

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_s$$

Considerando la duración del pulso del láser en una fibra, podemos decir que la luz es dispersada a una sección de la fibra cuya longitud  $W$  está determinada por la duración del pulso  $\tau$ , y la velocidad de grupo  $v_{\text{ngr}}$  de la señal luminosa en la fibra.

(3.3)

$$W = \tau v_{\text{ngr}} = \tau \frac{c}{n_{\text{gr}}}$$

Donde:

$c$  = velocidad de la luz

$n_{\text{gr}}$  = índice de grupo del vidrio

La potencia dispersada  $dP_s$ , en una posición  $z$  con una longitud infinitesimal  $dz$  es proporcional a la potencia del pulso  $P(z)$ ,

(3.4)

$$dP_s = kP(z)dz$$

Donde:

$K = S\alpha_s$ , siendo  $\alpha_s$  el coeficiente de dispersión ( $\sim 1/\lambda^4$ ) y  $S$  es la fracción de luz dispersada en todas direcciones que es capturada por el núcleo de la fibra y guiada de regreso al OTDR. El coeficiente de captura retrodispersado está dado por:

(3.5)

$$S = \left(\frac{NA}{n_0}\right)^2 \frac{1}{m}$$

Donde:

$NA$  = Apertura numérica de la fibra

$n_0$  = índice de refracción del núcleo de la fibra

$m$  depende del valor del índice de refracción (su valor típico en fibras de vidrio monomodo es de 4.55)

Para entender la localización de algún punto de la fibra del OTDR, consideremos el frente principal de un pulso geométrico con un ancho  $W$  donde recorrerá una distancia en  $T$  segundos hacia delante y la misma distancia en  $T$  segundos hacia atrás. Cuando el pulso de luz es retrodispersado y llega hasta al punto de inicio, este pulso de luz con retrodispersión recorrió dos veces la misma longitud en un tiempo  $2T$  y tendrá la suma de todas sus potencias de la luz con retrodispersión. Así, tomamos la ecuación (3.4) para aplicar la integral y un cambio de variable de su intervalo inferior 0 y superior  $W$ . La suma de integral de la potencia de luz con retrodispersión de un pulso con ancho  $W$  en una distancia que se transmitió en una fibra con parámetros definidos es

(3.6)

$$P_S(L) = \int_0^W S \alpha_s P_0 e^{-2\alpha(L+\frac{z}{2})} dz$$

Al desarrollar esta ecuación obtenemos dos ecuaciones. La primera considera que la mitad del ancho del pulso es inferior o igual a la distancia que recorrerá el pulso.

(3.7)

$$P_S(l) = S \frac{\alpha_s}{\alpha} P_0 e^{-2\alpha l} [1 - e^{\alpha W}] \text{ para } l \geq W/2$$

O en su forma aproximada para cuando  $\alpha W \ll l$

(3.8)

$$P_S(l) = S \alpha_s W P_0 e^{-2\alpha l}$$

Y cuando las distancias son menores que la mitad del ancho del pulso  $W/2$  se obtiene,

(3.9)

$$P_S(l) = S \frac{\alpha_s}{\alpha} P_0 e^{-2\alpha W} [1 - e^{\alpha l}] \text{ para } 0 \leq l \leq W/2$$

En su forma de aproximación para cuando  $l = w/2$  y  $\alpha W \ll l$  el valor inicial de la potencia retrodispersada es,

(3.10)

$$P_{init} = S \alpha_s W P_0$$

Las aproximaciones de las ecuaciones (3.8) y (3.10) muestran el factor ancho del pulso. La potencia de retrodispersión es proporcional a la duración del pulso  $\tau$ , ecuación (3.3). Estas ecuaciones se utilizan y proporcionan suficiente exactitud para aplicaciones del OTDR.

Por último, si consideramos una excitación por CW (onda continua) a la entrada de la fibra, podemos realizar la estimación de las pérdidas de retorno con la potencia total de retrodispersión,  $P_{S,total}(L)$  en una fibra con longitud  $L$ . Entonces podemos tomar dentro de la integración en la ecuación (3.6) los límites 0 y  $L$ .

(3.11)

$$P_{S,total}(L) = \frac{1}{2\alpha} S \alpha_s P_0 [1 - e^{-2\alpha L}]$$

El término exponencial  $e^{-2\alpha L}$  indica que las fibras con muy grandes longitudes  $\alpha L \gg 1$ , tienen valores de potencia de retrodispersión que dependen del coeficiente de captura  $S$ , coeficiente de atenuación  $\alpha_s$  y coeficiente de atenuación por dispersión de Rayleigh  $\alpha$ .



## **4 / OTDR: Desarrollo y manual de usuario**

### **Sumario**

- Introducción
- Manual de usuario

## 4.1 / Introducción

Realizado el estudio teórico de los principales elementos de un sistema de comunicaciones ópticas común, procederemos a la explicación de la simulación realizada en Matlab de un OTDR para sistemas de comunicaciones por fibra óptica. Como se explicó en el apartado anterior, en el que se detalla el funcionamiento de un OTDR, encargándose éste de proporcionarnos la variación de la potencia óptica en función de la distancia y de los distintos elementos que componen el enlace de fibra óptica (conectores, empalmes).

### 4.1.1 / Función principal

EL desarrollo del OTDR para sistemas de comunicaciones por fibra óptica se desarrolla íntegramente en una única función. A continuación se muestra un diagrama de bloques de la misma, pero debemos tener en cuenta que el valor de cada bloque depende única y exclusivamente de los valores elegidos por el usuario al ejecutar la GUI.

En la simulación realizada, solo se tiene en cuenta el tramo de ida en cuanto al balance de potencias, es decir, no es un OTDR real. Para que lo fuera deberíamos multiplicar todas las variaciones de la potencia por dos (considerando el tramo de ida y vuelta).

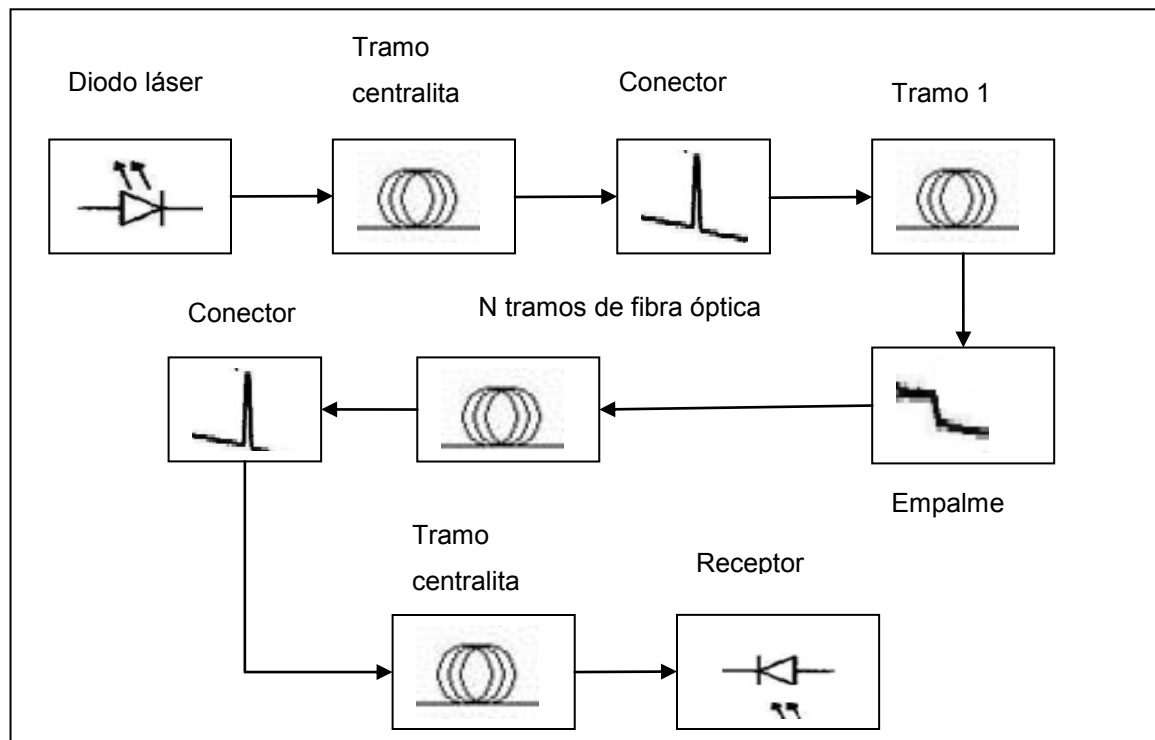


Figura 4.1 Esquema del OTDR implementado en Matlab

Como se puede observar en la figura anterior se inyecta la señal al enlace de fibra óptica por medio de un diodo láser, habiendo elegido éste en lugar del diodo LED por sus múltiples ventajas, las cuales se detallan en el estudio teórico.

Cada bloque del sistema hace referencia a unas características, tales como el tipo de fibra o empalme que depende de la elección del usuario y que se describirán en el capítulo siguiente. También se puede apreciar, que tanto para comenzar como para finalizar el enlace de fibra óptica, utilizamos un conector de fibra óptica a elegir por el usuario) y un tramo de 0.5 km de fibra óptica, que muestra un enlace entre dos centralitas telefónicas. Los tramos intermedios de fibra óptica se distribuirán, a elección del usuario que será el encargado de elegir tanto la longitud del enlace como la longitud del carrete (longitud de los tramos del enlace).

#### **4.1.2 / Función secundaria**

Con el fin de que la simulación realizada se parezca lo máximo posible a un OTDR real se ha utilizado una herramienta ya diseñada disponible en Mathworks. Se trata de dos cursores desplazables horizontalmente con el fin de medir las diferencias de distancia y potencia entre ambos, para comprobar por ejemplo la atenuación de un conector o empalme.

Con el fin de dejar los resultados de la simulación del GUI para el próximo capítulo, utilizaremos un sencillo ejemplo para mostrar lo anteriormente expuesto. Definiremos dos vectores, uno llamado distancia y otro llamado potencia, realizando un sencillo tramo de fibra óptica con un pequeño tramo al principio, un empalme y un tramo más largo al final. Tras esto se dibujarán estos dos vectores, añadiendo por último el cursor.

Este cursor dibujará en pantalla dos líneas rojas desplazables. Cada línea roja tiene asociado una caja amarilla de texto en la que se indica el valor de distancia y potencia del punto en la que está situada. Además de esto, en la parte inferior de la gráfica se indicará la diferencia tanto en distancia como en potencia de los dos cursores.

A la función original, se le han realizado un par de modificaciones sencillas para adaptarse mejor a la GUI desarrollada. En lugar de poner “x” o “y”, se ha sustituido por “distancia” y

“potencia”. A continuación se muestra tanto el pequeño código desarrollado como varias gráficas que muestran la forma en la que trabajan los cursores.

```
distancia=[0 0.3 0.5 0.51 1 2 3 4 5 6];  
  
potencia = [0 -0.06 -0.1 -0.35 -0.45 -0.65 -0.85 -1.05 -1.25 -1.45];  
  
plot(distancia, potencia, 'LineWidth',2);  
  
xlabel('Distancia (Km)');  
  
ylabel('Potencia (dBm)');  
  
dualcursor
```

Figura 4.2 Código de ejemplo en Matlab para la explicación de los cursores

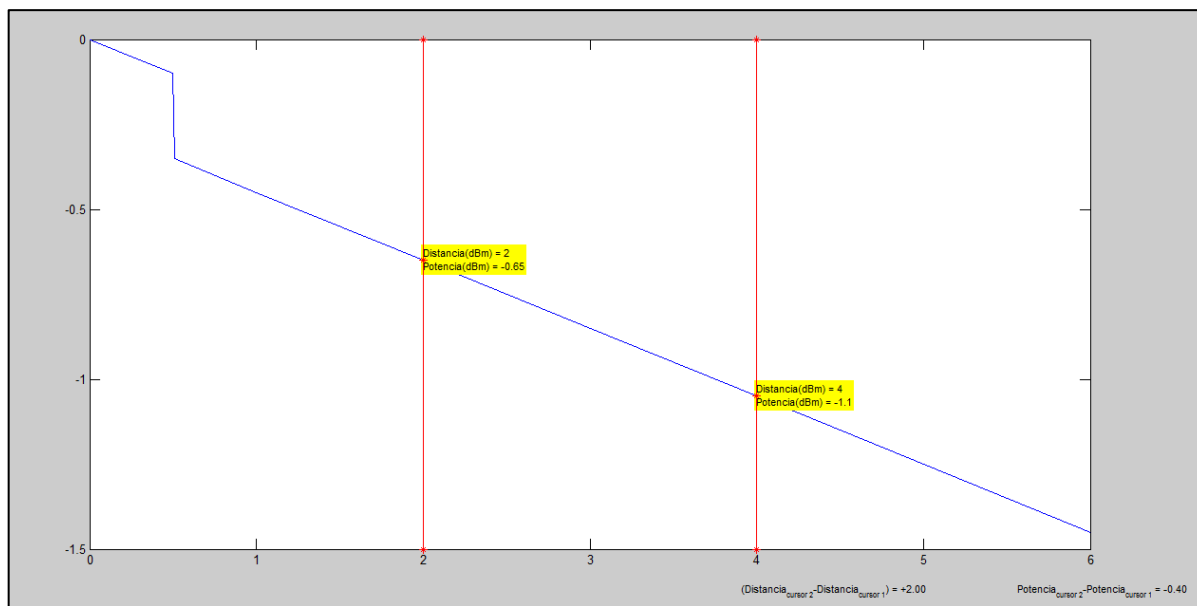


Figura 4.3 Resultado del ejemplo con los cursores añadidos

Como se puede apreciar en la gráfica anterior, hemos obtenido la representación de los dos vectores antes citados y aparecen los dos cursores con los que a modo de ejemplo mediremos la atenuación de la fibra en un km. Para una mejor visualización a continuación

aparecen dos imágenes, una con los datos que aparecen en la parte posterior con la diferencia entre los dos cursores y otra con la zona entre los dos cursores.



Figura 4.4 Resultado de la medida de la atenuación en un km

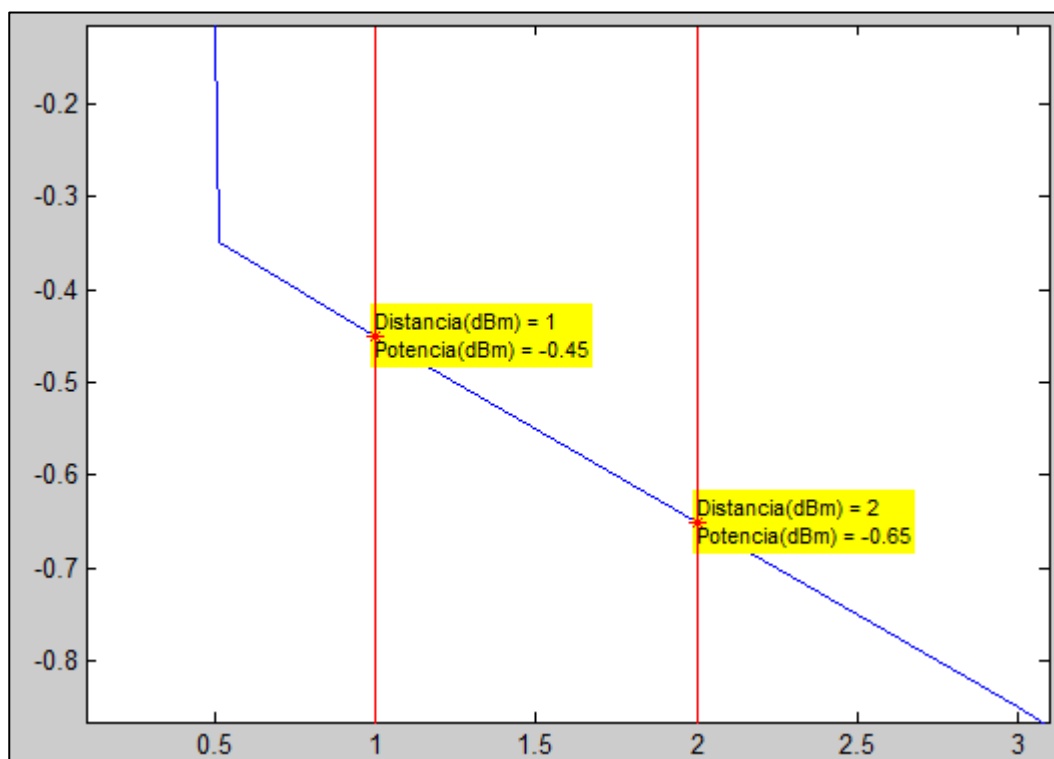


Figura 4.5 Ampliación de la zona a medir

Como se observa en la primera imagen (o realizando un sencillo cálculo en la segunda), la atenuación de la fibra óptica en un km es de 0.2 dB.

## 4.2 / Manual de usuario

La pantalla de inicio de la GUI desarrollada, se inicializa con el archivo Inicio\_GUI.m, el cual siendo llamado desde la ventana de comandos de Matlab o desde el editor de Matlab, mostrándonos la siguiente figura:



Figura 4.6 Pantalla que aparece al ejecutar la GUI

La GUI desarrollada se puede dividir en tres bloques: la parte de la caracterización de la simulación una parte de datos de interés y una parte utilizada para una mejor visualización de los detalles. En la primera escogemos los datos del enlace de fibra óptica a visualizar en el gráfico, a la derecha del gráfico se muestran parámetros característicos del enlace de

fibra óptica (los cuales se detallarán en páginas posteriores y en la parte superior izquierda podemos observar los botones que nos permitirán aumentar y disminuir el zoom, así como desplazarnos por la gráfica y colocar un cursor para obtener valores en distintos puntos del enlace.

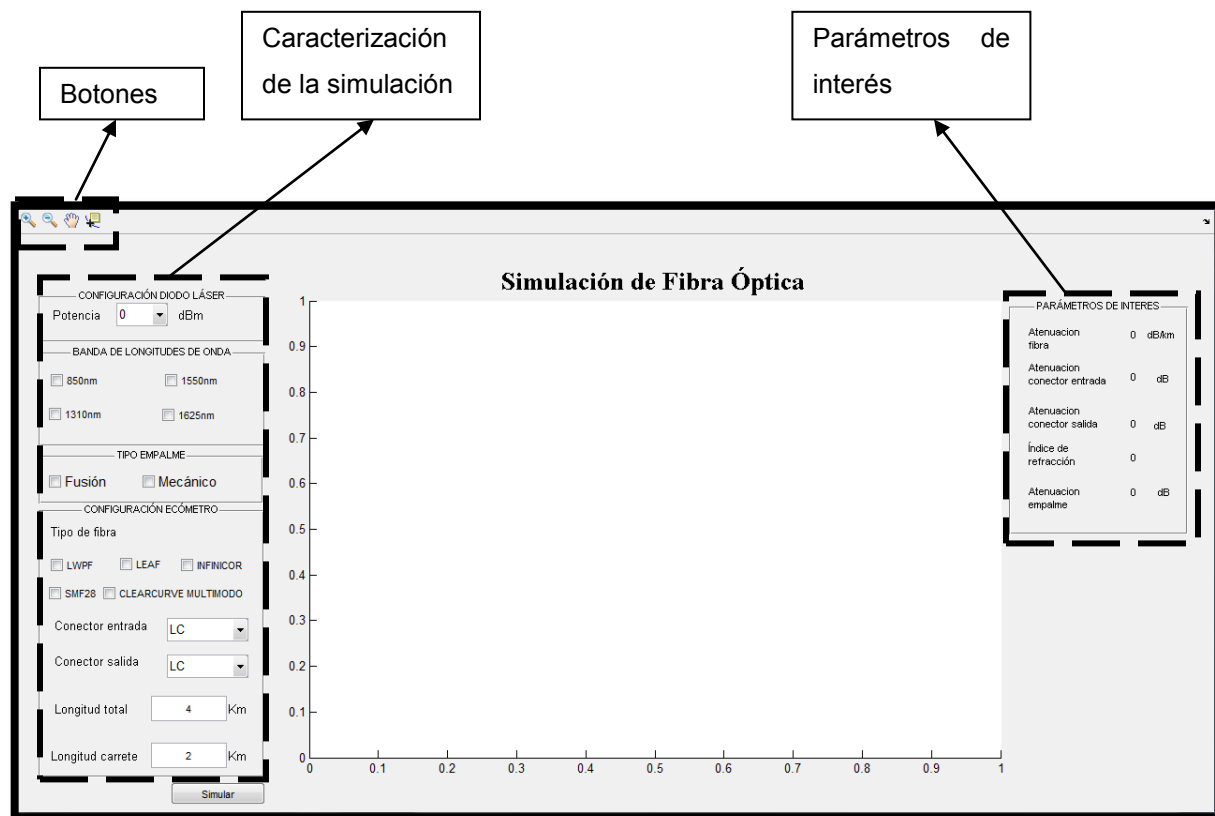


Figura 4.7 Pantalla principal de la GUI

#### 4.2.1 / Caracterización de la simulación

Antes de evaluar los resultados de una simulación se deben caracterizar adecuadamente los parámetros necesarios. En esta sección GUI, se seleccionan las características del enlace de fibra óptica que se desee visualizar por pantalla.

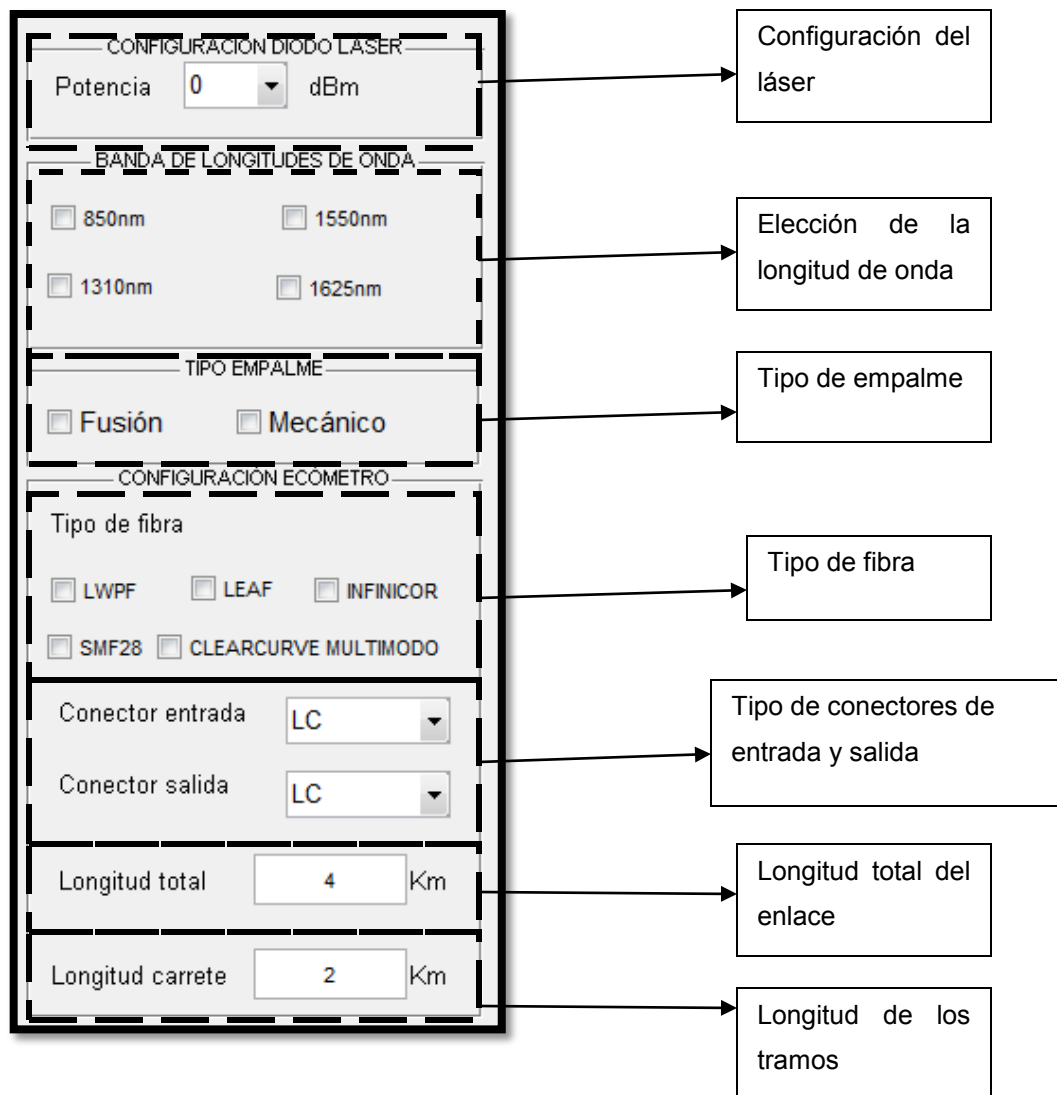


Figura 4.8 Bloque de caracterización de la simulación

#### 4.2.1.1 / Configuración del diodo láser

En la configuración del diodo láser elegiremos la potencia de entrada del enlace de fibra óptica (dBm). Los posibles valores son 0,-10,-20 y -30 (dBm).

El valor predeterminado es 0 (dBm).



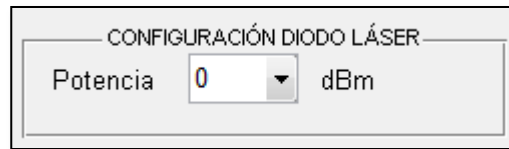


Figura 4.9 Configuración de la potencia del diodo láser

#### 4.2.1.2 / Elección de la longitud de onda

Como se ha desarrollado en el estudio teórico existen distintas ventanas de fibra óptica en las que se puede trabajar, pudiendo una misma fibra trabajar en dos longitudes de onda diferentes, obteniendo generalmente distintos valores de atenuación. Además se debe tener en cuenta que no todas las fibras pueden trabajar en todas las longitudes de onda, es decir, en algunas bandas presentan atenuaciones muy elevadas que hacen imposible cualquier transmisión de datos de forma correcta. Las posibles longitudes de onda son 850,1310, 1550 y 1625nm, que se corresponden con ventanas de baja atenuación para fibra óptica.

La GUI desarrollada sólo permite mostrar los resultados en una longitud de onda, por lo que si seleccionamos una de las longitud de onda, inmediatamente el resto no se podrán seleccionar hasta que se deseccione la primera.

Al iniciar la GUI todas las bandas de las distintas longitudes de onda están inhabilitadas, siendo necesario seleccionar una de ellas.

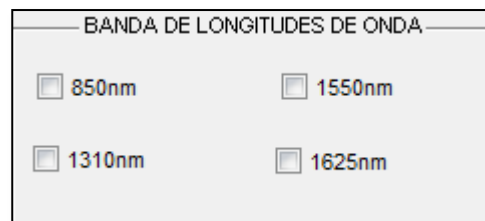
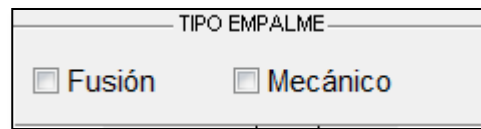


Figura 4.10 Cuadro de elección de la longitud de onda

#### 4.2.1.3 / Tipo de empalme

En el enlace de fibra óptica resultante los distintos tramos de fibra óptica se unirán mediante empalmes. Los tipos de empalme disponibles son por fusión y mecánico.



Formulario de selección de tipo de empalme. El título es "TIPO EMPALME". Hay dos opciones con casillas de verificación: "Fusión" y "Mecánico".

Figura 4.11 Cuadro de elección del tipo de empalme

Es de gran importancia señalar que el valor del empalme ya sea por fusión o mecánico, tanto en los sistemas reales como en esta simulación, no siempre es fijo por lo que se le añade a su valor “común” una cierta componente aleatoria que le hace variar de una simulación a otra.

En el caso del empalme por fusión:

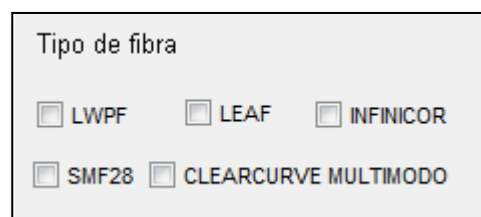
```
atenuacion_empalme = 0.1 + 0.05 * rand;
```

Y en el caso del empalme mecánico:

```
atenuacion_empalme = 0.35 + 0.25 * rand;
```

#### 4.2.1.4 / Tipo de fibra

Para continuar caracterizando el enlace de fibra óptica deberemos elegir el tipo de fibra óptica. Como se ha señalado anteriormente, no todas las fibras pueden trabajar utilizando todas las longitudes de onda disponibles, por lo que no siempre podremos seleccionar todas las fibras.



Formulario de selección de tipo de fibra. El título es "Tipo de fibra". Hay cinco opciones con casillas de verificación: "LWPF", "LEAF", "INFINICOR", "SMF28" y "CLEARCURVE MULTIMODO".

Figura 4.12 Cuadro de elección de la fibra óptica del enlace

Como se puede apreciar en el cuadro anterior hay cinco tipos de fibras. Cada una de ellas tiene diferentes características las cuales se detallan a continuación:

- LWPF( Low Water Peak Fiber):
  - Fibra monomodo que puede trabajar a:
    - 1310nm con una atenuación de 0.35 dB/km
    - 1550nm con una atenuación de 0.22 dB/km
    - 1625nm con una atenuación de 0.24 dB/km
  - Índice de refracción: 1.477
  
- LEAF
  - Fibra monomodo que puede trabajar a:
    - 1550nm con una atenuación de 0.20 dB/km
    - 1625nm con una atenuación de 0.22 dB/km
  - Índice de refracción: 1.468
  
- SMF28
  - Fibra monomodo que puede trabajar a:
    - 1310nm con una atenuación de 0.33 dB/km
    - 1550nm con una atenuación de 0.19 dB/km
    - 1625nm con una atenuación de 0.20 dB/km
  - Índice de refracción: 1.45
  
- Clearcurve Multimodo:
  - Fibra multimodo que puede trabajar a:

- 850nm con una atenuación de 2.3 dB/km
- 1310nm con una atenuación de 0.6 dB/km
- Índice de refracción: 1.48
- Infinicor:
  - Fibra multimodo que puede trabajar a:
    - 850nm con una atenuación de 2.9 dB/km
    - 1310nm con una atenuación de 0.6 dB/km
  - Índice de refracción: 1.496

Para una buena representación del enlace debemos tener en cuenta el valor del índice de refracción, ya que la resolución de la GUI dependerá de ello como se muestra a continuación:

(4.1)

$$Resolucion = \frac{1}{2} \partial \frac{c}{n_1}$$

Donde:

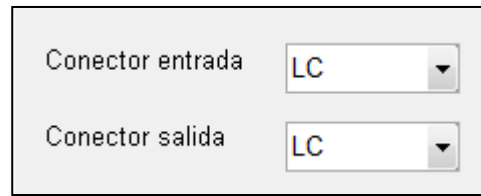
- $\partial = 100\text{ns}$  y corresponde a la duración del pulso de entrada del diodo láser.
- $c = 3 * 10^8 \text{ m/s}$  y corresponde a la velocidad de la luz en el vacío.
- $n_1$  = Índice de refracción del núcleo de la fibra utilizada.

#### **4.2.1.5 / Tipo de conectores de entrada y salida**

Como se ha indicado en el apartado anterior, el inicio y el fin del enlace de fibra óptica se consideran la salida y entrada a una central telefónica. Por ello en la salida de la central habrá un tramo de 0.5 km y un conector y a continuación comenzará el enlace de fibra solicitado por el usuario. El tramo de 0.5 km es del mismo tipo de fibra que el resto del

enlace. Por supuesto, a la entrada de la central final, habrá de igual manera un conector seguido de un tramo de 0.5 km.

Al igual que en el caso de las fibras ópticas, existen varios conectores seleccionables. Ya que son los mismos tanto para la entrada como para la salida a continuación se detallarán una única vez:

Un formulario con un fondo gris claro y una sombra. Contiene dos filas. La primera fila tiene el texto 'Conector entrada' a la izquierda y un menú desplegable con 'LC' seleccionado a la derecha. La segunda fila tiene el texto 'Conector salida' a la izquierda y otro menú desplegable con 'LC' seleccionado a la derecha. Los menús tienen una flecha hacia abajo en su extremo derecho.

*Figura 4.13 Cuadro de elección de los conectores de entrada y salida*

El valor predeterminado de ambos conectores es el conector "LC". Los diferentes tipos de conectores seleccionables son:

- LC con una atenuación de 0.25dB
- SC con una atenuación de 0.25dB
- ST con una atenuación de 0.25dB
- FSD con una atenuación de 0.6dB
- SMA con una atenuación de 1.5dB

Como se puede observar los tres primeros conectores tienen unas pérdidas razonables y los dos últimos aumentan, no obstante, se deberán tener en cuenta todas las características del conector antes de decantarse por uno u otro. Por ejemplo, el conector LC ha sido muy popular desde los años 80 dada su gran relación calidad/precio, mientras que el conector SC es muy utilizado en redes en las que se debe poder cambiar rápidamente cualquier elemento de un enlace ya que es muy fácil de colocar gracias a su mecanismo de acoplamiento tipo "Push Pull".

#### 4.2.1.6 / Longitud total del enlace

En esta parte de la GUI se debe introducir la longitud total del enlace de fibra óptica (km), siendo su valor predeterminado 4 (km).

A screenshot of a GUI element. It consists of a light gray rectangular box with a thin black border. Inside the box, on the left, is the text 'Longitud total' in a black sans-serif font. To the right of this text is a white rectangular input field with a thin black border, containing the number '4'. To the right of the input field is the text 'km' in a black sans-serif font.

Figura 4.14 Elección de la longitud total de la fibra

#### 4.2.1.7 / Longitud del carrete

En esta parte de la GUI se indica la longitud máxima de cada tramo de fibra óptica dentro de cada enlace, es decir, si el tramo es de 6 km y la longitud del carrete es de 1.9 km tendremos tres tramos de 1.9 km y un último tramo de 0.3 km. El valor predeterminado es de 2 km.

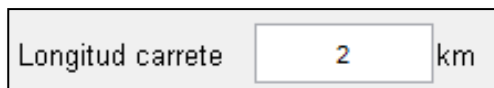
A screenshot of a GUI element. It consists of a light gray rectangular box with a thin black border. Inside the box, on the left, is the text 'Longitud carrete' in a black sans-serif font. To the right of this text is a white rectangular input field with a thin black border, containing the number '2'. To the right of the input field is the text 'km' in a black sans-serif font.

Figura 4.15 Elección de la longitud del carrete

#### 4.2.2 / Parámetros característicos

Una vez seleccionados todos los datos de entrada pulsaremos el botón simular y la GUI nos dibujará el enlace seleccionado. Como se habrá podido apreciar en la GUI, se seleccionan todos los elementos sin conocer su atenuación (tipo de fibra, empalmes, conectores), por ello en la parte derecha de la GUI aparece un cuadro denominado parámetros de interés que nos mostrará estos valores.

PARÁMETROS DE INTERES		
Atenuacion fibra	0.35	dB/km
Atenuacion conector entrada	0.25	dB
Atenuacion conector salida	0.25	dB
Índice de refracción	1.477	
Atenuacion empalme	0.108623	dB

Figura 4.16 Ejemplo de cuadro resumen de valores

Como se puede observar, se trata de una especie de cuadro resumen del enlace representado en la gráfica de la GUI. Hay cinco parámetros:

- Atenuación de la fibra (dB/km)
- Atenuación conector de entrada (dB)
- Atenuación conector de salida (dB)
- Índice de refracción de la fibra
- Atenuación del empalme (dB)

### 4.2.3 / Herramientas gráficas

Como ya sabemos las distintas fibras poseen distintas atenuaciones, lo que hace que en algunos casos no podamos visualizar correctamente los resultados debido a la gran longitud del enlace. Por ello, se han programado varios botones:



Figura 4.17 Botones para interactuar con la gráfica

Hay cuatro posibles herramientas para mejorar la visualización del resultado. Dos de las herramientas son para ampliar y disminuir el zoom, otra sirve para desplazarse por la gráfica y la cuarta herramienta es un cursor que nos indica el valor de potencia y distancia en el punto de la gráfica seleccionado. En el próximo capítulo en el que se simularán distintos tipos de fibras se utilizarán estas herramientas para una mejor comprensión.

#### **4.2.4 / Ruido**

Como se trata de una simulación, no existen todas las posibles dificultades que hay en un enlace de fibra óptica real, sin embargo, en todas las simulaciones aparecerá un ruido térmico asociado a la señal, que será de mayor o menor importancia dependiendo del nivel de potencia, cuanto menor sea esta menor será la relación señal a ruido, pudiendo llegar al extremo de no poder visualizar el resultado con claridad por el alto nivel de ruido.



## **5 / Resultados y estudios de simulación**

### **Sumario**

- Introducción
- Simulación 1
- Simulación 2
- Simulación 3

## **5.1 / Introducción**

Para una correcta comprensión de la GUI desarrollada, se irán simulando distintos enlaces de fibra óptica con el fin de poder apreciar lo que ocurre con las distintas fibras y sus atenuaciones, así como los diferentes tipos de empalmes y conectores. Para ello se simularán tres enlaces, con las siguientes características:

- Simulación 1: Enlace con pocos tramos y de corta duración para poder apreciar los distintos conectores y empalmes, así como las distintas potencias de entrada. Todo esto se realizará variando la longitud del carrete.
- Simulación 2: Enlace de larga longitud con muchos tramos de fibra óptica utilizando el zoom para apreciar correctamente los resultados.
- Simulación 3: Enlace de larga longitud con fibra de alta atenuación para apreciar la disminución de la relación señal a ruido.

## 5.2 / Simulación 1

### 5.2.1 / Parte 1

	Potencia entrada	Longitud de onda	Tipo de fibra	Conector de entrada	Conector de salida	Empalme	Longitud del carrete	Longitud total
Datos del enlace	0 dBm	1310nm	LWPF	LC	ST	Fusión	2.1 km	4.5 km

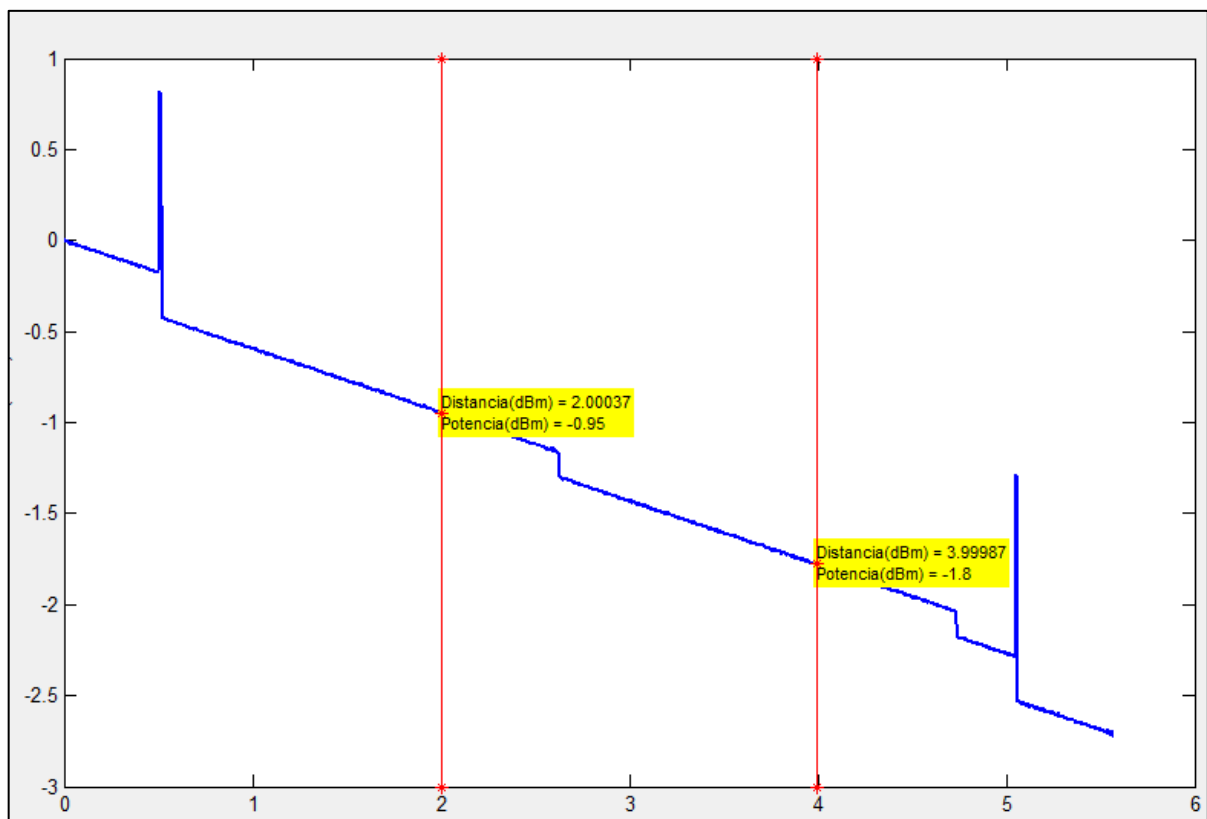


Figura 5.1 Resultado de la simulación 1 en la GUI

Antes de pasar a hablar de los resultados podemos observar que hay tres tramos de fibra óptica como era de suponer. Dos tramos de 2.1 km y un tercer tramo de 0.3 km (además de los enlaces con las centrales, claro está).

Para medir las distintas características del enlace podemos utilizar los cursores desplazables. Pero también podemos fijarnos en la parte derecha de la GUI, donde aparece un cuadro resumen con distintos parámetros de interés del enlace simulado. A continuación se mostrará el resultado por los dos métodos.

PARÁMETROS DE INTERES		
Atenuacion fibra	0.35	dB/km
Atenuacion conector entrada	0.25	dB
Atenuacion conector salida	0.25	dB
Índice de refracción	1.477	
Atenuacion empalme	0.108623	dB

Figura 5.2 Cuadro resumen con algunos valores importantes del enlace

En primer lugar vamos a comprobar que la atenuación de la fibra son 0.35 dB/km. Como se puede apreciar en las dos próximas imágenes así es. También podemos apreciar que al realizar zoom sobre una zona concreta se puede observar con mayor precisión el ruido adherido a la señal, pero en este caso prácticamente no varía la potencia.

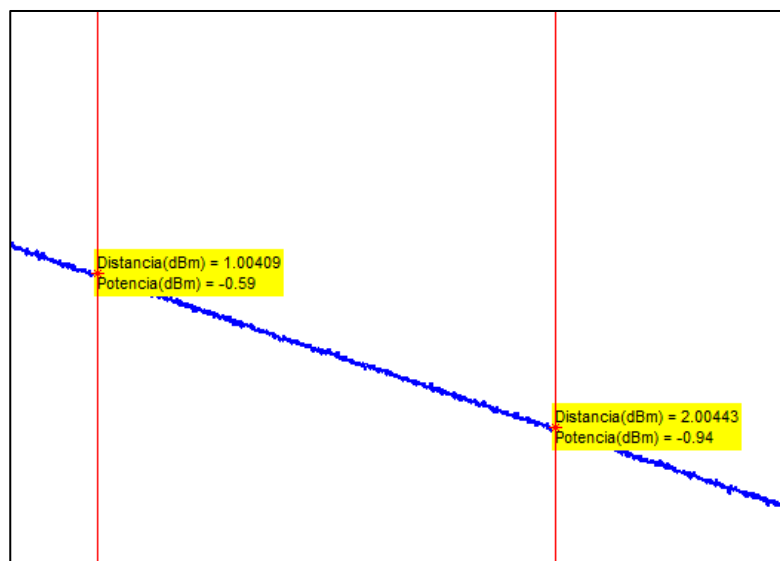


Figura 5.3 Verificación de la atenuación por medio de los cursores

$$(Distancia_{\text{cursor 2}} - Distancia_{\text{cursor 1}}) = +1.00 \quad (Potencia_{\text{cursor 2}} - Potencia_{\text{cursor 1}}) = -0.35$$

Figura 5.4 Segunda verificación por medio de la diferencia entre cursores

En segundo lugar, comprobaremos que la atenuación de los conectores es de 0.25 dB. Dicha atenuación de conector se cumple para los dos casos pero con el fin de simplificar el resultado se mostrarán a continuación, únicamente las imágenes correspondientes al conector de entrada.

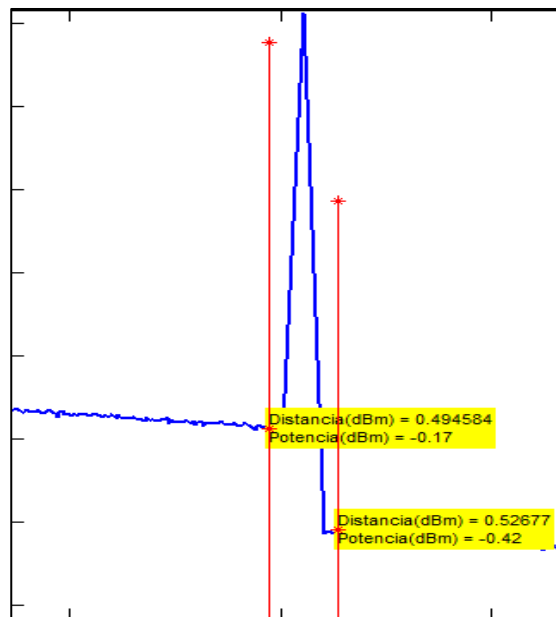


Figura 5.5 Medida de la atenuación del conector de entrada con los cursores

$$(Distancia_{\text{cursor 2}} - Distancia_{\text{cursor 1}}) = +0.03 \quad (Potencia_{\text{cursor 2}} - Potencia_{\text{cursor 1}}) = -0.25$$

Figura 5.6 Diferencia entre cursores de la figura 5.5

El dato del índice de refracción de la fibra nos da la resolución de la gráfica, resolviendo la ecuación (4.1) para cada caso concreto.

En tercer lugar, mediremos la atenuación del empalme por medio de los cursores para comprobar que la atenuación del mismo es efectivamente la que indica el cuadro de la GUI.

$$(Distancia_{\text{cursor 2}} - Distancia_{\text{cursor 1}}) = +0.02 \quad (Potencia_{\text{cursor 2}} - Potencia_{\text{cursor 1}}) = -0.11$$

Figura 5.7 Resultado de la atenuación del empalme

Y por último comprobaremos que la longitud de cada carrete es de 2.1 km, ya que la longitud total del enlace se puede apreciar claramente que es de 4.5 km, que se suman a los tramos de entrada y salida de la central telefónica (0.5 km cada uno), quedando una longitud de 5.5 km, aproximadamente.

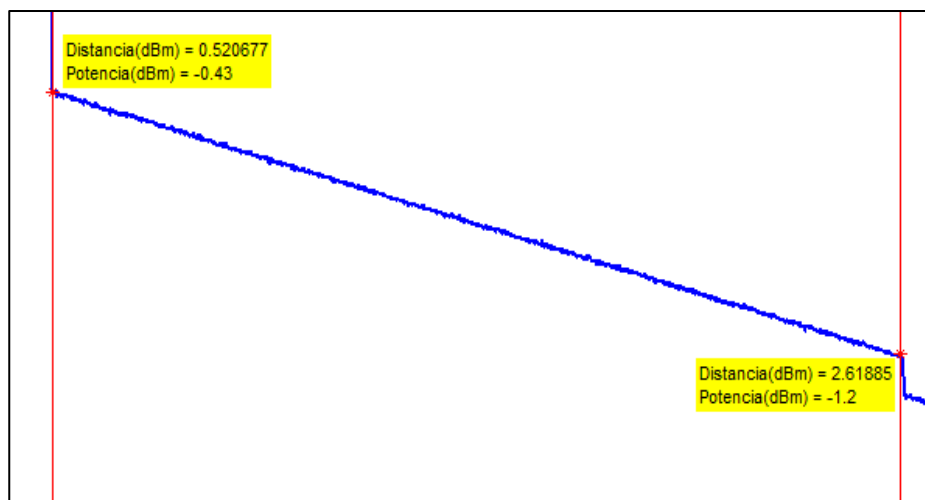


Figura 5.8 Comprobación de la longitud del carrete

$$(Distancia_{\text{cursor 2}} - Distancia_{\text{cursor 1}}) = +2.10 \quad (Potencia_{\text{cursor 2}} - Potencia_{\text{cursor 1}}) = -0.73$$

Figura 5.9 Comprobación de la longitud del carrete (II). Diferencia de cursores

### 5.2.2 / Parte 2

A continuación, manteniendo parte de los parámetros de entrada, pero cambiando algunos otros procederemos a simular un enlace de fibra óptica en tercera ventana con conectores y empalmes de peor calidad que en el caso anterior.

	Potencia entrada	Longitud de onda	Tipo de fibra	Conector de entrada	Conector de salida	Empalme	Longitud del carrete	Longitud total
Datos del enlace	-10 dBm	1550nm	SMF28	SMA	ST	Mecánico	2.1 km	4.5 km

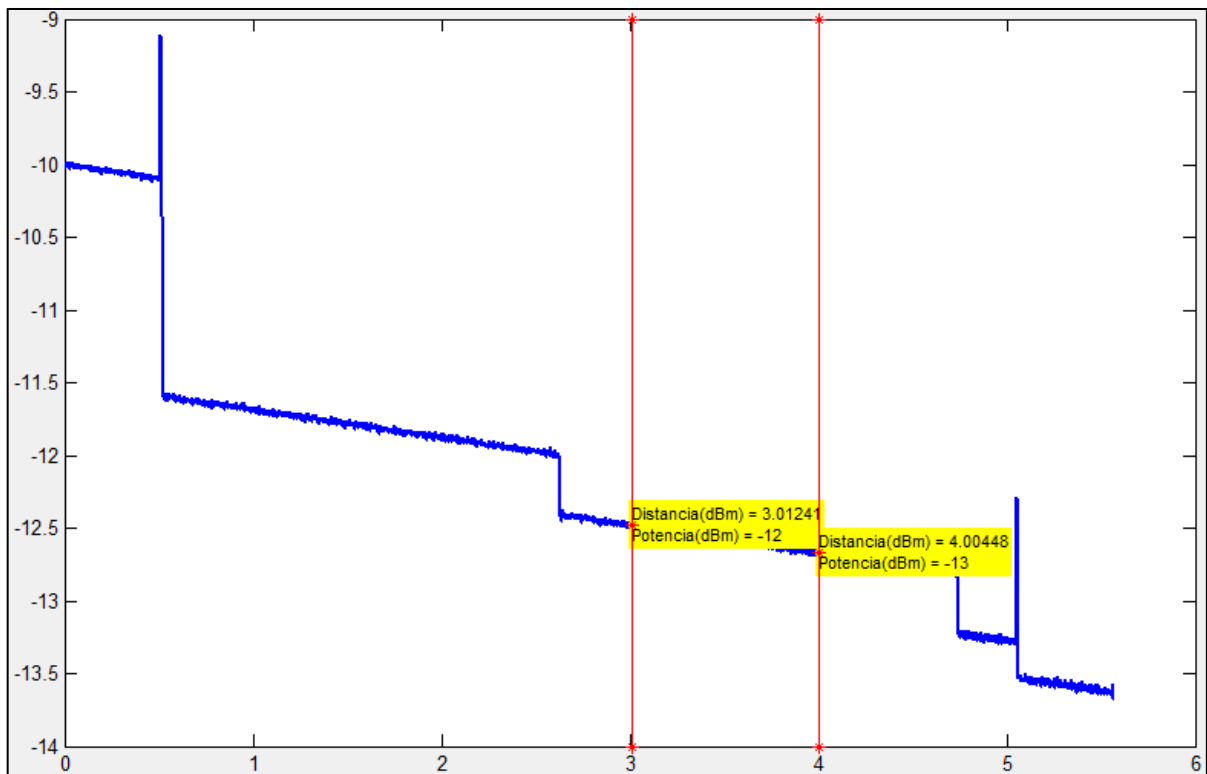


Figura 5.10 Resultado de la simulación 1. Parte 2

$$(Distancia_{cursor\ 2} - Distancia_{cursor\ 1}) = +0.99 \quad (Potencia_{cursor\ 2} - Potencia_{cursor\ 1}) = -0.19$$

Figura 5.11 Atenuación de la fibra

Como se puede apreciar la atenuación de la fibra óptica en este caso es de 0.19 dB/km, por lo que no varía demasiado respecto al caso anterior. Las tres grandes diferencias de esta simulación son:

- El cambio del tipo de empalme (fusión por mecánico), pasando de una atenuación de 0.11 dB a una atenuación de 0.416 dB.
- Aumento claramente apreciable de la relación señal a ruido debido al cambio de la potencia de entrada.



- Aumento de la atenuación del conector de entrada, al haber cambiado el tipo del mismo. Se ha pasado de una atenuación de 0.25 dB a una atenuación de 1.5 dB, dado que el conector SMA es un conector que introduce pérdidas muy elevadas.

### 5.3 / Simulación 2

	Potencia entrada	Longitud de onda	Tipo de fibra	Conector de entrada	Conector de salida	Empalme	Longitud del carrete	Longitud total
Datos del enlace	-10 dBm	1550nm	LEAF	SMA	SMA	Mecánico	1 km	22 km

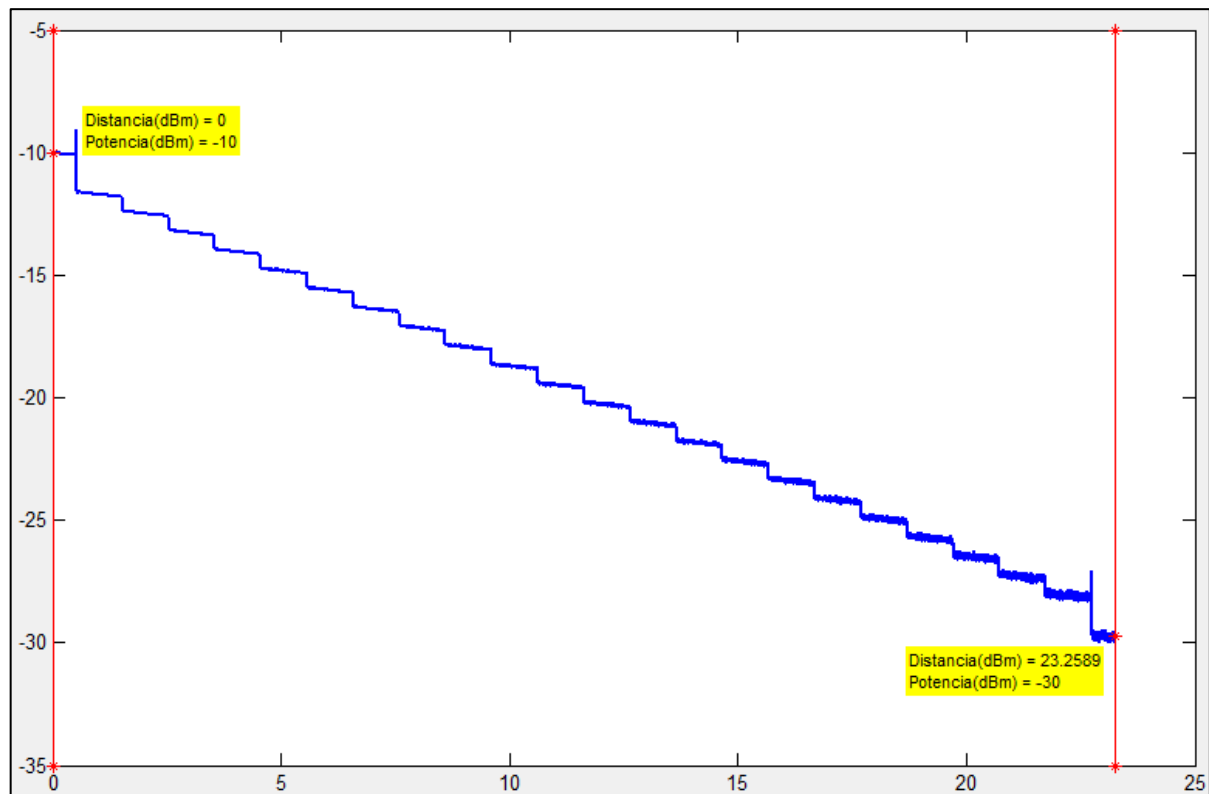


Figura 5.12 Resultado de la simulación 2

Para ver como el número de carretes, el número de empalmes y conectores, así como, su atenuación afectan a la potencia de salida realicemos un sencillo balance de potencias. El resultado final debe ser unos -30 dBm de potencia de salida como podemos observar en la gráfica anterior.

(5.1)

$$\begin{aligned} \text{Balance de potencias} \rightarrow \rightarrow pot_{salida} (dBm) &= pot_{entrada} (dBm) - \alpha_c n_c - \alpha_e n_e - L(km) \alpha_{atenuacio} n_{fibra} \\ &= -10(dBm) - 1.5 * 2 - 0.579 * 21 - (22 + 0.5 + 0.5) * \frac{0.2dB}{km} \end{aligned}$$

Efectivamente el resultado es -29.759≈-30 dBm

Veamos que ocurre cambiando el tipo de conector a uno con menor atenuación. También se cambiará el tipo de empalme y el número de los mismos, cambiando la longitud del carrete.

	Potencia entrada	Longitud de onda	Tipo de fibra	Conector de entrada	Conector de salida	Empalme	Longitud del carrete	Longitud total
Datos del enlace	-10 dBm	1550nm	LEAF	SC	SC	Fusión	22km	22 km

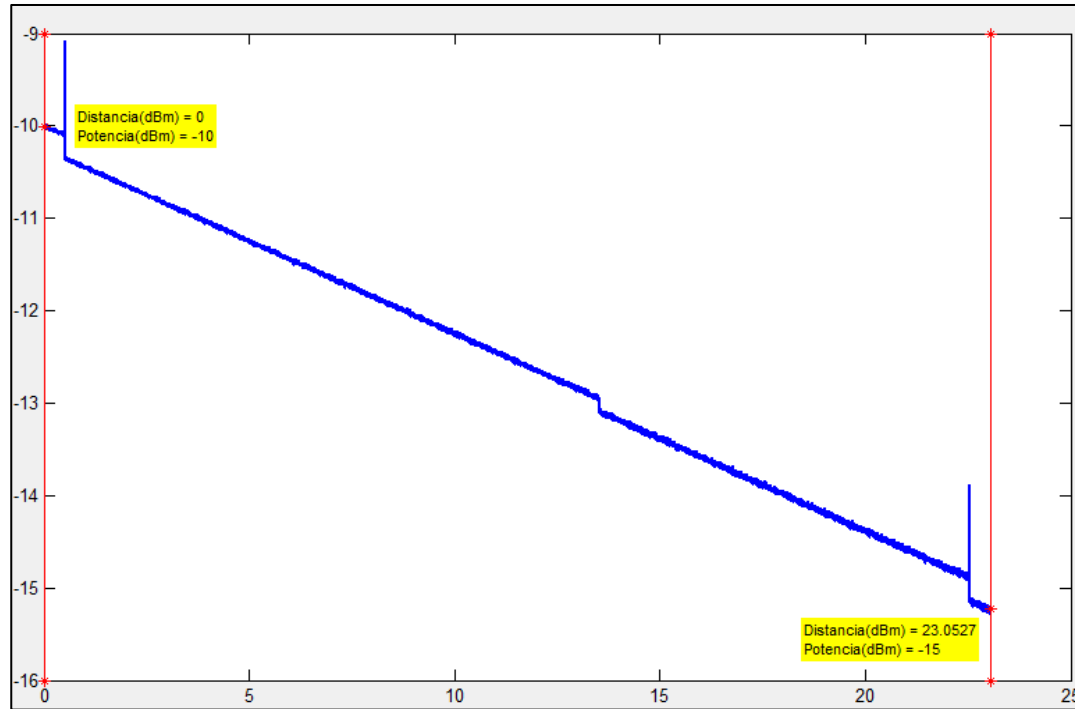


Figura 5.13 Resultado de la simulación 2. Parte 2

Realicemos el mismo balance de potencias, para ver la gran diferencia entre ambos casos:

(5.2)

$$\begin{aligned}
 \text{Balance de potencias} \rightarrow \rightarrow pot_{salida} (dBm) &= pot_{entrada} (dBm) - \alpha_c n_c - \alpha_e n_e - L(km) \alpha_{atenuacio} n_{fibra} \\
 &= -10(dBm) - 0.25 * 2 - 0.14 * 1 - (22 + 0.5 + 0.5) * \frac{0.2dB}{km}
 \end{aligned}$$

El resultado ahora es -15.04 dBm de potencia de salida, es decir, una diferencia de 15 dB, es decir, 31.6 veces más potencia a la salida de diferencia entre los dos casos. En la realidad el número de tramos depende también de la dispersión del tipo de fibra óptica que aquí no se tiene en cuenta y muchos otros factores que hacen más difícil la determinación de las distancias y componentes de un enlace de fibra óptica.

### 5.4 / Simulación 3

	Potencia entrada	Longitud de onda	Tipo de fibra	Conector de entrada	Conector de salida	Empalme	Longitud del carrete	Longitud total
Datos del enlace	0 dBm	850nm	INFINICOR	LC	SMA	Mecánico	3.5 km	25 km

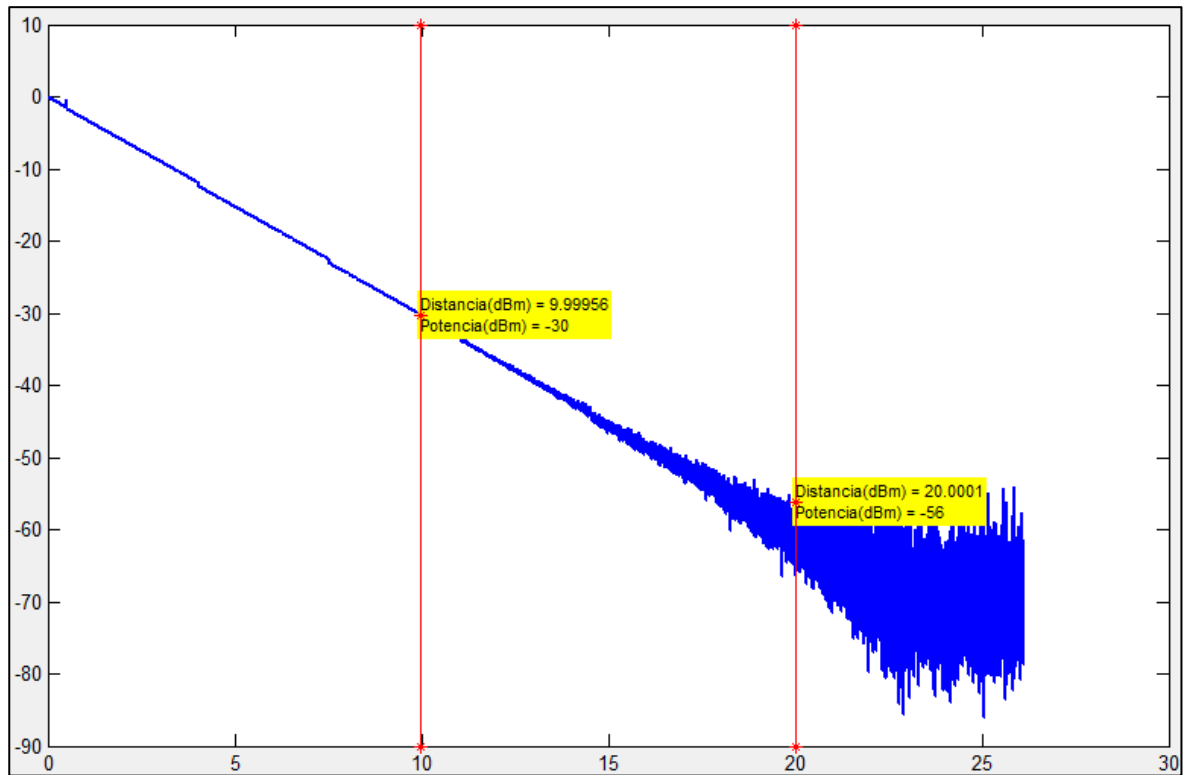


Figura 5.14 Resultado de la simulación 3

A diferencia de los casos anteriores, la fibra utilizada tiene una atenuación 2.9 dB/km mucho más elevada que en simulaciones anteriores. Se puede apreciar, que a medida que nos vamos alejando el ruido cada vez afecta más a la señal. También podemos apreciar que cuando la potencia sobrepasa el valor de -70 dBm aparece un suelo de ruido, ya que supera los niveles de potencia admisibles para el OTDR simulado. A continuación vamos a cambiar el tipo de fibra óptica a una con menor atenuación pero con un enlace de gran tamaño para apreciar también la variación de la relación señal a ruido.

	Potencia entrada	Longitud de onda	Tipo de fibra	Conector de entrada	Conector de salida	Empalme	Longitud del carrete	Longitud total
Datos del enlace	0 dBm	850nm	CLEARCURVE MULTIMODO	LC	SMA	Mecánico	3.5 km	25 km

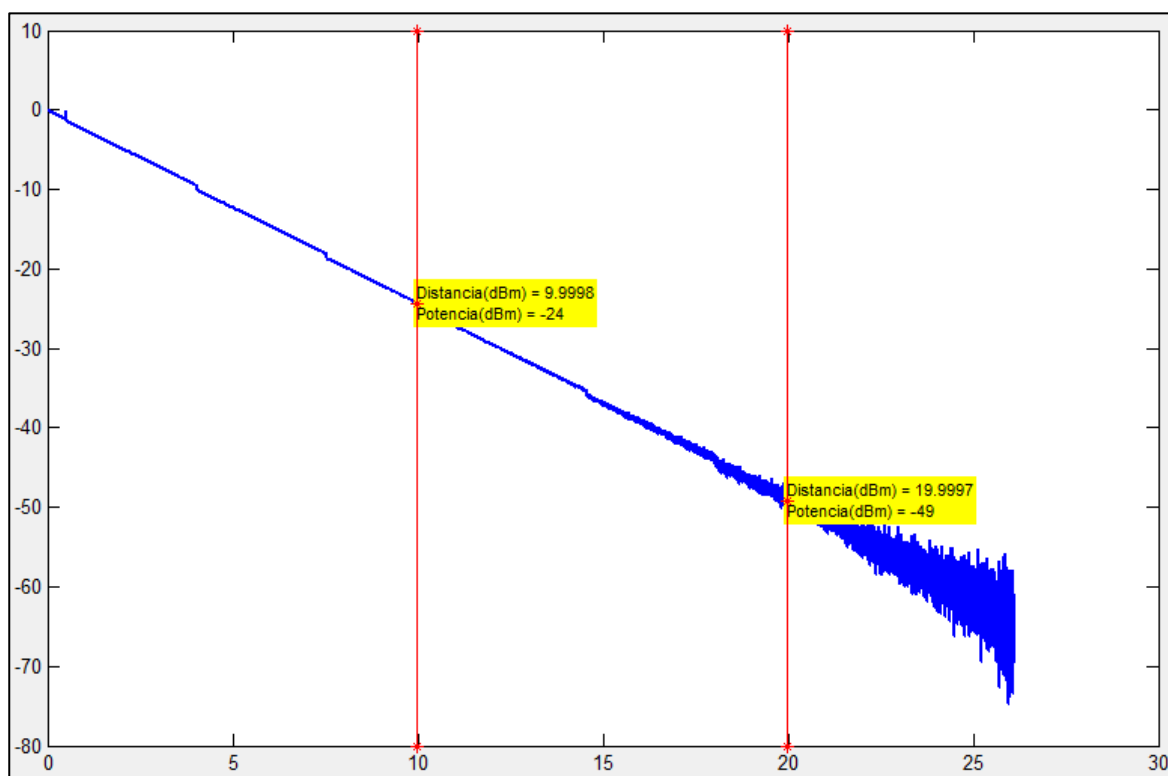


Figura 5.15 Resultado de la simulación 3. Parte 2

Con este tipo de fibra también obtenemos una relación señal a ruido muy mala llegando a la central de destino. En comparación con el resto de simulaciones realizadas, estos dos últimos enlaces son de muy baja calidad en lo que a relación señal a ruido se refiere, no obstante, si los enlaces no fueran de tan larga distancia podrían considerarse enlaces adecuados o si amplificásemos periódicamente la señal mediante un EDFA (Anexo 3) cada cierta distancia.

## **6 / Conclusiones y trabajos futuros**

### **Sumario**

- Conclusiones
- Trabajos futuros

## **6.1 / Conclusiones**

En relación a todo lo cubierto en el desarrollo del proyecto se pueden plantear las siguientes afirmaciones:

- El desarrollo de una interfaz gráfica permite mejor visualización y empleo de las funciones implementadas, todo ello para facilitar el uso de las herramientas a usuarios con conocimientos básicos de Matlab o de fibra óptica.
- Matlab es una de las herramientas más apropiadas para la simulación en el ámbito de las comunicaciones, tanto por la capacidad de programación numérica, como por las facilidades de desarrollo gráfico que permite.
- La construcción de OTDR cada vez más precisos, permite localizar con bastante exactitud un posible fallo en un enlace así como la variación de potencia a lo largo del mismo.
- La elección de los correctos elementos a la hora de diseñar un enlace concreto (empalmes, conectores, tipos de fibra), es tanto importante como necesaria para obtener unos niveles de potencia y dispersión adecuados a la salida.
- Al igual que en el resto de sistemas de comunicaciones, se ha podido comprobar lo necesario que es mantener una relación señal a ruido adecuada, con el fin de recibir a la salida del enlace un nivel de potencia por encima de un umbral, necesario para el correcto funcionamiento del sistema.



## **6.2 / Trabajos futuros**

Como se ha podido ver a lo largo del proyecto, la simulación del OTDR para sistemas de comunicaciones de fibra óptica nos ha permitido observar distintos enlaces, así como los problemas más frecuentes que se pueden dar en un enlace de fibra común. A pesar de lo anteriormente expuesto, existen varias posibilidades de ampliación y mejora de este proyecto.

- Balance de dispersión: Al igual que se ha diseñado un OTDR que nos muestra por pantalla la variación de los niveles de potencia a lo largo de la fibra, sería muy útil, con el fin de conocer más sobre la dispersión en fibras ópticas, la realización de un balance de dispersión. El OTDR realizado no tiene en cuenta la dispersión y por ello su principal y casi único problema es el ruido. Con esta propuesta de ampliación deberemos tener en cuenta la interferencia entre símbolos y los distintos mecanismos para regenerar y amplificar la señal.
- EDFA: Con el fin de amplificar y regenerar la señal, cuando los niveles tanto de potencia como de dispersión no estén por encima de los umbrales necesarios para la correcta recepción de la señal en el destino, se podrán implementar amplificadores ópticos, colocados periódicamente o cuando las prestaciones de la fibra no superen los umbrales necesarios.
- LASER: Como se ha podido observar, no se ha prestado especial atención a la caracterización de las fuentes por parte del usuario dando a elegir únicamente la potencia de entrada entre cuatro posibilidades. Una gran mejora a la simulación realizada sería mejorar tanto los amplificadores del sistema como sus receptores, pues son parte importante de un sistema de comunicaciones.
- Rotura de un enlace: Con el fin de poder apreciar uno de los principales usos de un OTDR, se podrá determinar el lugar en el que un enlace de fibra óptica pueda romperse y a partir de la velocidad con la que se propaga la señal por la fibra utilizada, poder determinar con una gran exactitud el lugar de la rotura.
- Apertura numérica: Con el fin de hacer enlaces más parecidos a la realidad, diseñaremos un enlace de fibra óptica en el que se podrán elegir distintos tipos de

fibra óptica para poder observar la que ocurre al unir fibras con distintos “conos de aceptación”

## **7 / Presupuesto**

### **Sumario**

- Presupuesto

## 7.1 / Presupuesto

Para realizar el presupuesto del presente proyecto, nos pondremos en la situación de un Ingeniero Técnico de Telecomunicación que presta sus servicios de forma independiente a un cliente, entregándole como coste total lo detallado a continuación.

El presupuesto estimado del proyecto se divide, en los recursos de personal y en los recursos materiales, para los costes de personal es preciso saber el tiempo empleado en la elaboración del proyecto (incluyendo programación, redacción,...), el cual fragmenta a su vez las horas dedicadas en actividades distintas; en la

Tabla 7.1 se muestra con detalle el presupuesto en recursos de personal.

Tipo de trabajo realizado	Horas dedicadas	Salario por hora	Total
Búsqueda de información	80	20 €	1.600 €
Implementación del Software	120	52 €	6.240 €
Ensayos y simulaciones	30	52 €	1.560 €
Redacción de la memoria	45	20 €	900 €

*Tabla 7.1. Presupuesto detallado para recursos de personal.*

Con lo detallado, el presupuesto por recursos de personal asciende a la suma de 10.300 €.

En la Tabla 7.2 se detalla el presupuesto en recursos materiales.

Tipo de recursos materiales	Precio
Material de papelería	40 €
Reprografía	100 €
Otros (Licencia de Matlab, Línea ADSL, Ordenador, Impresora)	3.000 €

*Tabla 7.2. Presupuesto detallado para recursos de material.*

Con lo detallado, el presupuesto por recursos de material asciende a la suma de 3.140 €.

Por tanto el coste total del proyecto realizado, incluido el Impuesto sobre el Valor Añadido (IVA) del 21%, sería 16.262,24 €.

## **8 / Bibliografía**

### **Sumario**

- Bibliografía

## 8.1 / Bibliografía

La bibliografía utilizada para realizar el presente trabajo es la siguiente:

**[Dutton 98]** Harry J. R. Dutton, "Understanding Optical Communications", IBM, 1998.

**[DeCusatis 02]** Casimer DeCusatis, "Handbook of Fiber Optic Data Communicationas", IBM, Academic Press, 2002.

**[Miranda 02]** José Miguel Miranda, José Luis Sebastián, Manuel Sierra, José Margineda "Ingeniería de Microondas, Técnicas experimentales", *Prentice Hall* 2002.

**[Orlando 08]** Diego Orlando Barragán Guerrero, "Manual de interfaz gráfica de usuario en Matlab", Parte 1.

**[Goff 02]** D. R. Goff, "Fiber Optic Reference Guide" D. R. Goff", *Focal Press*, Tercera edición, 2002.

**[Crisp 01]** J.Crisp, "Introduction to Fiber Optics" Newness ,2001.

**[Morales 06]** Carlos Morales Carvajal , "Estudio de la exactitud y precisión para localización de perturbaciones basadas en el método análisis por transmisión - reflexión (MATR) en un sensor de fibra óptica distribuido", Tesis Doctoral, C.I.C.E.S.E. (Centro de investigación científica y de educación superior de Ensenada) , 2006.

**[España 05]** Maria Carmen España Boquera, "COMUNICACIONES ÓPTICAS, Conceptos esenciales y resolución de ejercicios", Diaz de Santos, 2005.

**[Guisande 06]** C. Guisande González, A. Barreiro Felpeto, I. Maneiro Estraviz, I. Riveiro Alarcon, A. R. Vergara Castaño, A. Vaamonde Liste, "Tratamiento de Datos", Diaz de Santos, 2006.

**[Smith 06]** Scott T. Smith, "Matlab Advanced GUI Development", Dog ear, 2006.

**[Bates 01]** Bates, Regis J "Optical Switching and Networking Handbook", McGraw-Hill, 2001.

Catálogos de Fibras ópticas, Corning 2011.

<http://www.corning.com/WorkArea/showcontent.aspx?id=41241>

<http://www.corning.com/WorkArea/showcontent.aspx?id=36549>

<http://www.corning.com/WorkArea/showcontent.aspx?id=41261>

*Apuntes de clase de la asignatura Sistemas de Telecomunicación, Madrid, EUITT de Telecomunicación.*

*Apuntes de clase de la asignatura Teoría de la Comunicación, Madrid, EUITT de Telecomunicación.*

*Apuntes de clase de la asignatura Comunicaciones Ópticas, Madrid, EUITT de Telecomunicación.*



## **9 / Anexos**

### **Sumario**

- Anexo 1: Resonador
- Anexo 2: Birrefringencia
- Anexo 3: EDFA
- Anexo 4: Catálogos de fibras ópticas utilizadas

## 9.1 / Anexo 1: Resonador

Un resonador es cualquier dispositivo o sistema que sea capaz de entrar en resonancia o que tiene la capacidad de comportarse de manera resonante, lo cual quiere decir que oscila a unas determinadas frecuencias con una amplitud más grande que a las otras. Los resonadores se utilizan tanto para generar ondas de frecuencias determinadas o para seleccionar frecuencias específicas de una señal. A frecuencias altas, no será posible implementar estos resonadores ya que:

Por un lado, las dimensiones necesarias para resonancias en modos de orden bajo son del orden de la longitud de onda haciendo difícil, si no inviable, su construcción. La utilización de modos de mayor Orden, que podría solventar este problema, es imposible ya que el intervalo de frecuencia entre modos disminuye al aumentar el orden, siendo prácticamente imposible la operación del resonador en un modo aislado. Por otro, las pérdidas en los conductores crecen con la frecuencia  $R_S = \sqrt{\omega \frac{\mu_0}{2\delta}} = \omega \mu_0 \delta_S / 2$  y por tanto el factor de calidad disminuye.

En contrapartida, a medida que aumenta la frecuencia es más fácil colimar los campos en zonas determinadas del espacio y resultan más útiles los resonadores abiertos como es el Fabry-perot.

### 9.1.1 / Resonador Fabry-Perot

Consiste en un medio de caras planas y paralelas separadas una distancia  $d$ , que se comportan como 2 espejos que con sucesivas reflexiones forman una retroalimentación que a ciertas frecuencias, resuena. Este resonador tiene un índice de refracción  $n_2$ , e inmerso en otro medio infinito de índice de refracción  $n_1$ . Sobre dicho medio se hace incidir una radiación que forme un ángulo  $\theta_1$  con la normal a las caras, de acuerdo con los conceptos de reflexión y refracción, se creará un conjunto de haces tanto refractados como reflejados, que se muestran en la siguiente figura.

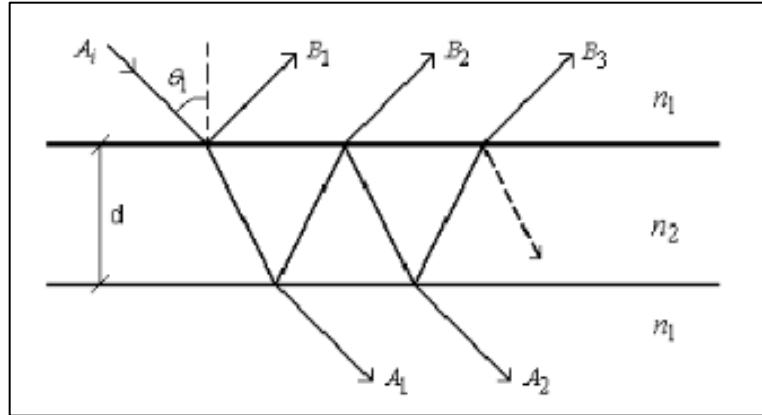


Figura 9.1 Esquema de funcionamiento del interferómetro

Para valores de retardo de fase periódicos, es decir  $2m\pi$ , se cumple que la intensidad transmitida es igual a la intensidad incidente, sin pérdidas por reflexión; expresión representada por la ecuación:

(9.1)

$$I_t = I_r + I_i$$

Del análisis de las trayectorias seguidas por los haces de reflexión y refracción, se llega a obtener la siguiente expresión, representada por la ecuación:

(9.2)

$$\lambda_m = \frac{2n_2d}{m}$$

En la siguiente gráfica aparece el espectro del interferómetro de Fabry-Perot, donde R es la fracción de potencia reflejada en la superficie de separación entre medios de diferente índice de refracción.

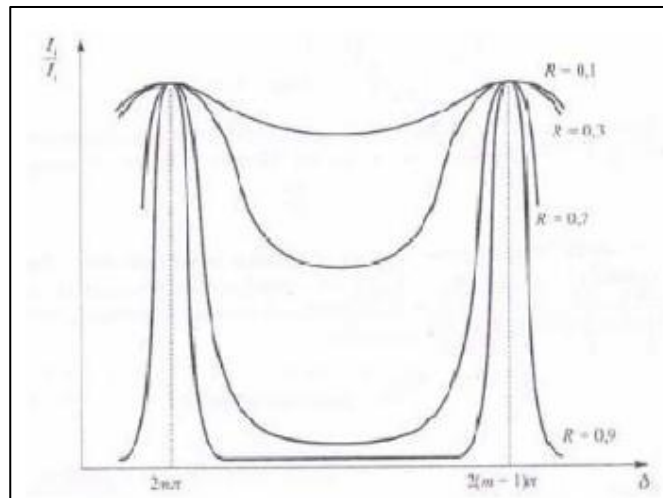


Figura 9.2 Espectro del interferómetro de Fabry-Perot.

## 9.2 / Anexo 2: Birrefringencia

En una fibra ideal se cumple que la constante de propagación  $\beta$ , es idéntica en todos los puntos del núcleo de la fibra, sin embargo, en una fibra real esto no se cumple, debido a imperfecciones en el núcleo debidas a la no circularidad del mismo y a las variaciones de los perfiles de los índices de refracción. Debido a estas variaciones, se produce el fenómeno de birrefringencia, propagándose dos modos  $LP_{01}$  diferentes, uno según el eje x y otro según el eje y.

(9.3)

$$\text{Fibra ideal} \rightarrow \beta_x = \beta_y$$

(9.4)

$$\text{Fibra real} \rightarrow \beta_x \neq \beta_y$$

Al tener distinta constante de propagación los modos se propagan a diferente velocidad, lo que da lugar a una dispersión.

(9.5)

$$\beta_f = n_y - n_x \rightarrow \beta = \beta_0(n_y - n_x)$$

$$10^{-8} \leq \beta_f \leq 10^{-3}$$

### 9.3 / Anexo 3: EDFA

La amplificación es el proceso de restaurar la señal óptica a su poder óptico original y sin distorsión después de que la señal haya perdido potencia al pasar a través de un hilo de fibra. Este proceso es particularmente importante en entornos WDM. Los amplificadores estándares no tienen elementos electrónicos y consecuentemente no precisan la clásica conversión eléctrico-óptico y óptico-eléctrico, eliminando así la necesidad de ancho de banda adicional. El desarrollo reciente más importante ha sido la comercialización de los amplificadores EDFA, que amplifican las señales en muchas longitudes de onda diferentes simultáneamente.

La fibra, como todo medio de transmisión, introduce una determinada atenuación que provoca la necesidad de emplear amplificadores o regeneradores cuando los enlaces superan una cierta longitud. En los últimos tiempos se han desarrollado nuevos amplificadores EDFA, amplificadores de fibra dopados con erbio, capaces de completar todo el proceso de amplificación en el dominio óptico. Otra de las ventajas que introducen este tipo de dispositivos es que permiten amplificar varias o todas las longitudes de onda que se transmiten en una fibra, es factible conseguir EDFA's con curvas de ganancia planas en tercera ventana, es decir, que, combinándolos con DWDM, además de lograr un ahorro en fibra, también permite reducir el número de amplificadores necesarios.

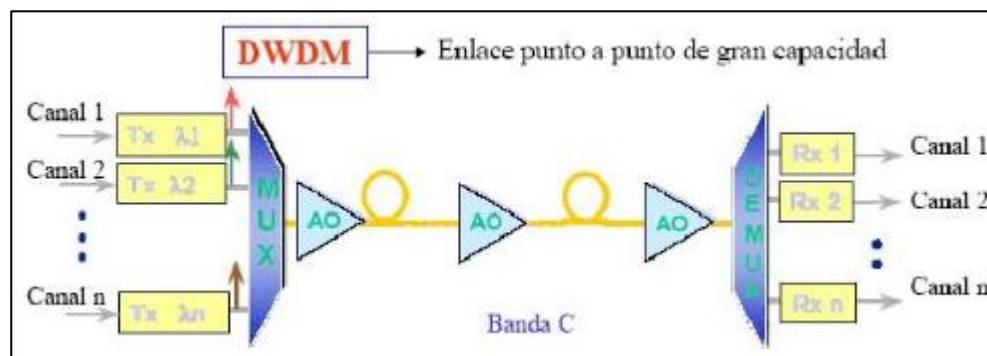



Figura 9.3 Ejemplo de utilización de amplificadores ópticos

## 9.4 / Anexo 4: Catálogos de fibras ópticas utilizadas



**OPTICAL FIBRE** DATA SHEET Ed. 04/2010-12-16

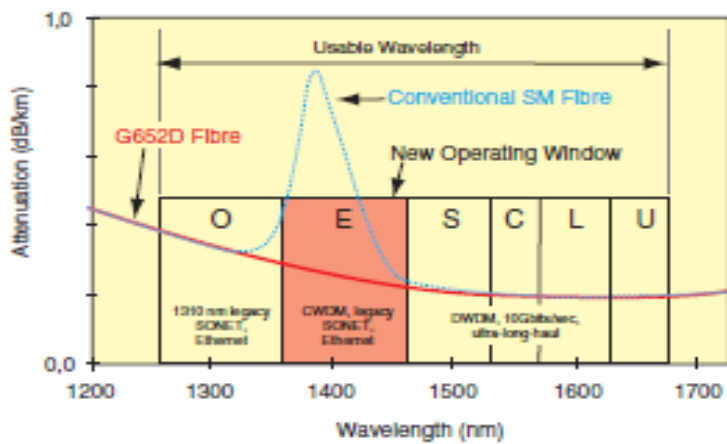
Kabelwerk **EUPEN** AG  
cable

### Fibre specifications

1/2

#### Singlemode-Fibre

In our production we use the Low Water Peak Fibre ITU G652D as standard.



Typical optical, geometrical and mechanical data are:  
(values after cabling)

Attenuation @ 1310nm	< 0,35 dB/km
Attenuation @ 1382nm, H2-aged	< 0,35 dB/km
Attenuation @ 1550nm	< 0,22 dB/km
Attenuation @ 1625nm	< 0,24 dB/km
Chromatic dispersion @ 1310nm	≤ 3 (ps/(nm.km))
Chromatic dispersion @ 1550nm	≤ 18 (ps/(nm.km))
Mode field diameter @ 1310nm	9,2 ± 0,4 μm
Mode field diameter @ 1550nm	10,3 ± 0,5 μm
Cladding diameter	125 ± 1,0 μm
Core/cladding concentricity	< 0,6 μm
Cladding non-circularity	< 1%
Coating Diameter	245 ± 7 μm
Screen test	0,7GPa (100kpsi); 1 % strain equivalent

All data comply with or exceed the ITU-T recommendation G652D.

Other data are available on request.

For special applications such as FTTH or FiTH, we offer BendBright® singlemode optical fibre conform to ITU G657A&B and ITU G652D.

Other Singlemode-Fibre like ITU G655 (NZDS) are available on request.

ISO  
Certified  
Company

KABELWERK EUPEN AG - Molmedijer Straatje 9 - 4780 EUPEN - BELGIUM Tel.: +32(0)87.58.70.00 - Fax: +32(0)87.58.71.00 - <http://www.eupen.com>



### Multimode-Fibre

Fibre class	Fibre-type $\mu$	Bandwidth 850/1300nm MHz.km	Attenuation 850/1300nm dB/km	1Gb/s Link		10Gb/s Link	10Gb/s Link
				850nm	1300nm	850nm Serial	1300nm WWDWM
				1000Base-SX m	1000Base-LX m	10GBase-SR	10GBase-LX4 or LRM
OM-1™	62,5	200/600	2,8/0,7	500	1000	65	450
OM-2™	50	600/1200	2,4/0,6	750	2000	110	900
OM-3	50	EMBc= 2000/500	2,4/0,6	1000	550	300	300
OM-3™ (OM-4)	50	EMBc= 4700/500	2,4/0,6	1100	550	550	300

Typical optical, geometrical and mechanical data are:

Numerical aperture	0,200 $\pm$ 0,015
IOR typical	1,482 @850nm, 1,477 @1300nm
Core	50 or 62,5 $\pm$ 2,5 $\mu$ m
Cladding diameter	125 $\pm$ 1,0 $\mu$ m
Core non-circularity	$\leq$ 5 %
Cladding non-circularity	$\leq$ 1 %
Coating diameter	245 $\pm$ 7 $\mu$ m
Coating non-circularity	$\leq$ 5 %
Screen test	0,7GPa (100kpsi); 1 % strain equivalent

All data comply with or exceed the ITU G651 respectively IEC 60793-2-10 type A1a.1.

Other data are available on request.

### Fibre color code

Fibre No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Color	Blue	Yellow	Red	White	Green	Purple	Orange	Grey	Light Blue	Black	Brown	Pink
Fibre No.	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Color	Blue/White	Yellow/White	Red/White	White/White	Green/White	Purple/White	Orange/White	Grey/White	Light Blue/White	Black/White	Brown/White	Pink/White

### Tube color code

Counter tube	Red
Direction tube	Black
Follow tube :	
- Singlemode-Fibre	Yellow
- Multimode-Fibre 50 $\mu$ m	Green
- Multimode-Fibre 62,5 $\mu$ m	Blue

Other colors are available on request.



## Fibra óptica LEAF® de Corning®

### Información sobre el producto

**CORNING**

En la carrera por satisfacer la demanda global por ancho de banda, la fibra óptica LEAF® de Corning® es la ganadora indiscutible al ser la fibra de dispersión desplazada diferente de cero (NZ-DSF por sus siglas en inglés) con más insulaciones a nivel mundial. Optimizada para redes metropolitanas y de largo alcance, la fibra LEAF es un producto técnicamente avanzado que provee mayor capacidad, amplia flexibilidad a los sistemas y un desempeño superior. Adicionalmente, la fibra LEAF es líder en la industria en especificaciones de dispersión de modo de polarización (PMD) y presenta las menores pérdidas por atenuación que cualquier otra fibra NZ-DSF en el mercado, permitiendo a las redes evolucionar de los sistemas actuales de 10G a los sistemas de 40G y 100G del futuro.

### Especificaciones ópticas

#### Atenuación máxima

Longitud de onda (nm)	Valor máximo (dB/km)
1383 ± 3*	≤ 0.40
1410	≤ 0.32
1450	≤ 0.26
1550	≤ 0.20
1625	≤ 0.22

\*Los valores de atenuación en esta longitud de onda representan los resultados del envejecimiento por hidrógeno.

#### Atenuación vs. Longitud de onda

Rango (nm)	λ de ref. (nm)	Diferencia α Max. (dB/km)
1525 – 1575	1550	0.02
1625	1550	0.03

La atenuación en un determinado rango de longitud de onda no excede la atenuación de longitud de onda nominal (λ) por encima del valor de α.

#### Atenuación por macro doblado

Diámetro del Mandril (mm)	Número de vueltas	Longitud de onda (nm)	Atenuación inducida* (dB)
32	1	1550 & 1625	≤ 0.50
60	100	1550 & 1625	≤ 0.05

\*La atenuación inducida se debe al enrollado de la fibra alrededor de un eje de radio de un diámetro especificado.

#### Discontinuidad entre dos puntos

Longitud de onda (nm)	Discontinuidad entre dos puntos (dB)
1550	≤ 0.05

#### Diámetro del campo modal (MFD)

Longitud de onda (nm)	MFD (μm)
1550	9.6 ± 0.4

#### Dispersión

Longitud de onda (nm)	Valor de Dispersión (ps/(nm·km))
1530	2.0–5.5
1565	4.5–6.0
1625	5.8–11.2

#### Dispersión de Modo de Polarización (PMD)

Valor (ps/√km)
Valor de diseño de enlace PMD ≤ 0.04*
Fibra individual máxima ≤ 0.1

\*Cumple con la norma IEC 60794-3: 2001, sección 5.5, método 1, (m = 20, Q = 0.01%).

El valor de diseño de enlace PMD es un término utilizado para describir la PMD de las longitudes concatenadas de fibra. Este valor representa un límite estadístico superior para el enlace total PMD. Los valores PMD pueden cambiar durante el proceso de cableado de la fibra. Las especificaciones de la fibra de Corning admiten nuevos requisitos de diseño de redes para sistemas de transmisión rápida de datos que funcionan a 10 Gbps o más.

#### Compatible con los estándares:

- ITU-T G.655 (Tablas A, B, C, D)
- \*Especificaciones IEC 60793-2-50 Tipo B4\*
- TIA/EIA 492-EA00
- Telcordia's GR-20

#### Cómo efectuar pedidos

Comuníquese con el representante de ventas o llame al departamento de servicio al cliente:

Tel: 1-800-248-2000 (U.S.A. y Canadá)

+44-1294-525-520 (Europa)

Correo electrónico: [corning@corning.com](mailto:corning@corning.com)

Cuando efectúe su pedido, siempre

especificar el tipo de fibra, la atenuación

y la cantidad.

PIST107

FECHA DE PUBLICACIÓN: DICIEMBRE DE 2011  
SUSTITUYE: AGOSTO DE 2011

REGISTRADA EN TL9000/ISO 9001



powered with  
**DeSolite®**  
supercoatings

## Especificaciones dimensionales

### Geometría de vidrio

Rizo de fibra	≥ 4.0 m radio de curvatura
Diámetro de Revestimiento	125.0 ± 0.7 µm
Concentricidad de núcleo-	
Revestimiento	≤ 0.5 µm
No circularidad	
de Revestimiento	≤ 0.7%

### Geometría del Recubrimiento

Diámetro de Recubrimiento	242 ± 5 µm
Concentricidad de revestimiento-	
recubrimiento	≤ 12 µm

## Especificaciones ambientales

Prueba ambiental	Condición de prueba	Atenuación Inducida 1550 nm & 1625 nm (dB/km)
Dependencia de temperatura	-60°C to +85°C*	≤ 0.05
Ciclo de temperatura y humedad	-10°C a +85°C* hasta una humedad relativa ≥ 98%	≤ 0.05
Inmersión en agua	23° ± 2°C	≤ 0.05
Envejecimiento por calor	85° ± 2°C*	≤ 0.05
Calor húmedo	85°C a una humedad relativa de 85%	≤ 0.05

\*Temperatura de referencia: ± 23°C

Rango de temperatura de operación: -60°C to +85°C

## Especificaciones Mecánicas

### Prueba de resistencia mecánica

Toda la longitud de la fibra está sujeta a pruebas de resistencia mecánica a una tensión ≥ 100 kpsi (0.7 GPa)\*.

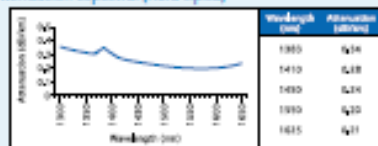
\*Disponible con pruebas de mayor resistencia mecánica.

## Caracterizaciones de Desempeño

Los parámetros indicados representan valores típicos.

Apertura numérica	0.14 La apertura numérica se mide a un nivel porcentual de ± por ciento de potencia en una lectura de campo distante unidimensional de 1550 nm.
Área efectiva (A <sub>eff</sub> )	1550 nm: 72 µm
Índice de refracción de grupo efectivo (N <sub>g,eff</sub> )	1550 nm: 1.468 1625 nm: 1.469
Parámetro de resistencia a la fatiga (N <sub>f</sub> )	20
Fuerza de desgaste a la fatiga	Seco: 0.6 lbs. (3N) Húmedo, 14-días a temperatura ambiente
Coefficiente de Rayleigh Backscatter de Rayleigh (para un ancho de impulso de 1 ns)	1550 nm: -81 dB 1625 nm: -82 dB
Dispersión cromática	1550 nm at 4 ps/(nm·km) 1625 nm at 10 ps/(nm·km)

### Atenuación espectral (fibra típica)



## Fórmulas

### Dispersión

$$D(\lambda) = D(\lambda_0) + \left( \frac{D(\lambda_0) - D(1550 \text{ nm})}{\lambda - 1550} \right) + D(1550 \text{ nm})$$

λ = Longitud de onda de operación de interés 1550 nm

$$D(\lambda) = D(\lambda_0) + \left( \frac{D(\lambda_0) - D(1550 \text{ nm})}{\lambda - 1550} \right) + D(1550 \text{ nm})$$

λ = Longitud de onda de operación desde 1550 nm a 1625 nm

### No circularidad de revestimiento

$$\text{No circularidad } (\%) = \left[ 1 - \frac{D(\text{Medio}) - D(\text{Extremo})}{D(\text{Medio}) - D(\text{Extremo})} \right] \times 100$$

CORNING

Corning Incorporated  
One Riverfront Plaza  
Corning, NY 14831 U.S.A.  
Tel: 607-268-2000 (U.S. and Canada)  
+44-1544-625-000 (Europe)  
Correo electrónico: corning@corning.com  
www.corning.com/opticalfiber

Corning, LEAF y CPC son marcas registradas de Corning Incorporated, Corning, NY.  
Defolite es una marca registrada de DSM.  
© 2017 Corning Incorporated

## Corning® Single-Mode Optical Fiber

### SMF-28™ Fiber

#### Product Information

##### The Standard For Performance

Corning® SMF-28™ single-mode fiber has set the standard for value and performance for telephony, cable television, submarine, and utility network applications. Widely used in the transmission of voice, data, and/or video services, SMF-28 fiber is manufactured to the most demanding specifications in the industry.

Taking advantage of today's high capacity, low cost transmission components developed for the 1310 nm window, SMF-28 fiber features low dispersion and is optimized for use in the 1310 nm wavelength region. SMF-28 fiber also can be used effectively with TDM and WDM systems operating in the 1550 nm wavelength region.

##### Protection And Versatility

SMF-28 fiber is protected for long-term performance and reliability by the CPC coating system. Corning's enhanced, dual acrylate CPC coatings provide excellent fiber protection and are easy to work with. CPC coatings are designed to be mechanically stripped and have an outside diameter of 245 µm. They are optimized for use in many single- and multi-fiber cable designs including loose tube, ribbon, slotted core, and tight buffer cables.

##### Patented Quality Process

SMF-28 fiber is manufactured using the Outside Vapor Deposition (OVD) process, which produces a totally synthetic ultra-pure fiber. As a result, Corning SMF-28 fiber has consistent geometric properties, high strength, and low attenuation. Corning SMF-28 fiber can be counted on to deliver excellent performance and high reliability, reel after reel. Measurement methods comply with ITU recommendations G.650, IEC 60793-1, and Bellcore GR-20-CORE.

##### Features And Benefits

- Versatility in 1310 nm and 1550 nm applications.
- Outstanding geometrical properties for low splice loss and high splice yields.
- OVD manufacturing reliability and product consistency.
- Optimized for use in loose tube, ribbon, and other common cable designs.

## Optical Specifications

### Attenuation

#### Standard Attenuation Cells

Wavelength (nm)	Attenuation Cells (dB/km)	
	Premium *	Standard
1310	≤ 0.35	≤ 0.40
1550	≤ 0.25	≤ 0.30

\* Lower attenuation available in limited quantities.

### Point Discontinuity

No point discontinuity greater than 0.10 dB at either 1310 nm or 1550 nm.

### Attenuation at the Water Peak

The attenuation at  $1383 \pm 3$  nm shall not exceed 2.1 dB/km.

#### Attenuation vs. Wavelength

Range (nm)	Ref. $\lambda$ (nm)	Max. $\alpha$ Difference (dB/km)
1285 - 1330	1310	0.05
1525 - 1575	1550	0.05

The attenuation in a given wavelength range does not exceed the attenuation of the reference wavelength ( $\lambda$ ) by more than the value  $\alpha$ .

#### Attenuation with Bending

Mandrel Diameter (mm)	Number of Turns	Wavelength (nm)	Induced Attenuation* (dB)
32	1	1550	≤ 0.50
50	100	1310	≤ 0.05
50	100	1550	≤ 0.10

\*The induced attenuation due to fiber wrapped around a mandrel of a specified diameter.

### Cable Cutoff Wavelength ( $\lambda_{cutoff}$ )

$\lambda_{cutoff} \leq 1260$  nm

### Mode-Field Diameter

$9.2 \pm .4$   $\mu$ m at 1310 nm

$10.4 \pm .8$   $\mu$ m at 1550 nm

### Dispersion

Zero Dispersion Wavelength ( $\lambda_0$ ):

$1301.5 \text{ nm} \leq \lambda_0 \leq 1321.5 \text{ nm}$

Zero Dispersion Slope ( $S_0$ ):

$\leq 0.092 \text{ ps}^2/\text{nm}^2 \cdot \text{km}$

$$\text{Dispersion} = D(\lambda) = -\frac{S_0}{4} \left[ \lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right] \text{ps}^2/\text{nm}^2 \cdot \text{km},$$

for  $1200 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1600 \text{ nm}$

$\lambda$  = Operating Wavelength

### Polarization Mode Dispersion

#### Fiber Polarization Mode Dispersion (PMD)

	Value (ps/ $\sqrt{\text{km}}$ )
PMD Link Value	≤ 0.1*
Maximum Individual Fiber	≤ 0.2

\* Complies with IEC SC 86A/WG1, Method 1, September 1997.

The PMD link value is a term used to describe the PMD of concatenated lengths of fiber (also known as the link quadrature average). This value is used to determine a statistical upper limit for system PMD performance.

Individual PMD values may change when cabled. Corning's fiber specification supports emerging network design requirements for a 0.5 ps/ $\sqrt{\text{km}}$  maximum PMD.

## Environmental Specifications

Environmental Test Condition	Induced Attenuation (dB/km)	
	1310 nm	1550 nm
Temperature Dependence -60°C to +85°C*	≤ 0.05	≤ 0.05
Temperature-Humidity Cycling -10°C to +85°C*, up to 98% RH	≤ 0.05	≤ 0.05
Water Immersion, 23° ± 2°C*	≤ 0.05	≤ 0.05
Heat Aging, 85° ± 2°C*	≤ 0.05	≤ 0.05

\*Reference temperature = +23°C

Operating Temperature Range -60°C to +85°C

## Dimensional Specifications

**Standard Length (km/reel):** 2.2 - 25.2<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Longer spliced lengths available at a premium.

### Glass Geometry

Fiber Curl:  $\geq 4.0$  m radius of curvature

Cladding Diameter:  $125.0 \pm 1.0$   $\mu\text{m}$

Core-Clad Concentricity:  $\leq 0.5$   $\mu\text{m}$

Cladding Non-Circularity:  $\leq 1.0\%$

Defined as:  $\left[ 1 - \frac{\text{Min. Cladding Diameter}}{\text{Max. Cladding Diameter}} \right] \times 100$

### Coating Geometry

Coating Diameter:  $245 \pm 5$   $\mu\text{m}$

Coating-Cladding Concentricity:  $< 12$   $\mu\text{m}$

## Mechanical Specifications

### Proof Test

The entire fiber length is subjected to a tensile proof stress  $\geq 100$  kpsi ( $0.7 \text{ GN/m}^2$ )<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Higher proof test levels available at a premium.

## Performance Characterizations

Characterized parameters are typical values.

**Core Diameter:** 8.2  $\mu\text{m}$

**Numerical Aperture:** 0.14

NA is measured at the one percent power level of a one-dimensional far-field scan at 1310 nm.

**Zero Dispersion Wavelength ( $\lambda_0$ ):** 1312 nm

**Zero Dispersion Slope ( $S_0$ ):** 0.090  $\text{ps}^2/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$

**Refractive Index Difference:** 0.36%

**Effective Group Index of Refraction ( $N_{eff}$ ):**

1.4677 at 1310 nm

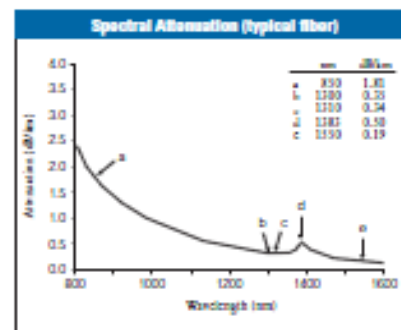
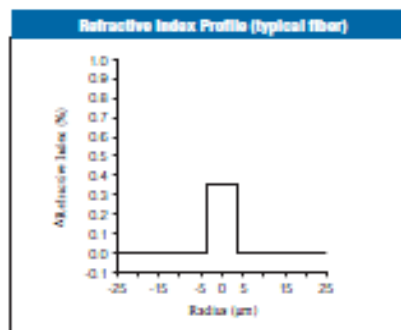
1.4682 at 1550 nm

**Fatigue Resistance Parameter ( $n_f$ ):** 20

**Coating Strip Force:**

Dry: 0.6 lbs (2.7 N)

Wet, 14-day room temperature: 0.6 lbs (2.7 N)





## Corning® ClearCurve® Multimode Optical Fiber Product Information



### Bend Performance and Compatibility

Corning® ClearCurve® ultra-bendable laser-optimized™ multimode optical fiber delivers the best macrobending performance in the industry while maintaining compatibility with current optical fibers, equipment, practices and procedures. ClearCurve OM2, OM3 and OM4 multimode fiber is designed to withstand tight bends and challenging cabling routes with substantially less signal loss than conventional multimode fiber. This new multimode optical fiber allows designers, installers and operators of enterprise networks (including local area networks, data centers and industrial networks) to use multimode optical fiber in a package that is easier to handle and install. With greater signal protection when subjected to tight bending, ClearCurve offers greater system security and reliability meaning maximized network up-time and lower associated maintenance costs.

Building on the proven bandwidth capability of Corning's InfiniCor® fibers, the world's first laser-optimized™ multimode fibers, ClearCurve multimode fibers increase your capacity to succeed:

- Industry leading macrobending performance below 10 mm radius
- High performance minEMBc certified bandwidth to support 850 nm transmission at data rates up to 100 Gb/s
- Higher data aggregation in the backbone, riser and high-speed parallel interconnects (HSPIs)
- Fully backwards-compatible and ideally suited to current and future broad range of laser-based protocols and applications
- Superior measurement technology and manufacturing control
- Industry-leading CPC® coatings for superior microbend and environmental performance

	ClearCurve® OM4 fiber	ClearCurve® OM3 fiber	ClearCurve® OM2 fiber
Optimized Data Rate over Distance	40/100 Gb/s over 170 m* 10 Gb/s over 550 m 1 Gb/s over 1100 m	40/100 Gb/s over 140 m* 10 Gb/s over 300 m 1 Gb/s over 1000 m	Not included in the standard 10 Gb/s over 150 m 1 Gb/s over 750 m
<b>Standards Compliance</b>			
ISO/IEC 11801	type OM4 fiber	type OM3 fiber	type OM2 fiber
IEC 60793-2-10	type A1a.3 fiber	type A1a.2 fiber	type A1a.1 fiber
TIA/EIA	492AAAD	492AAAC-B	492AAAB-A
ITU	ITU G.651.1	ITU G.651.1	ITU G.651.1

\*Distances specified in the 40G/100G per IEEE 802.3ba standard are 150m on OM4 and 100m on OM3; Corning fibers are manufactured to tighter dispersion specifications and thereby support the extended distances shown in the table (assuming cable attenuation ≤3.0 dB/km and same 1.0 dB of connector loss for OM3 that the standard requires for OM4).

PI1468 | ISSUED: JANUARY 2011 | SUPERSEDES: DECEMBER 2010 | TL9000/ISO 9001 REGISTERED

### The Smart, Reliable, Cost-Effective Network Choice

No one can match Corning's superior measurement technology and manufacturing control of the refractive index profile. Consequently, ClearCurve multimode optical fibers deliver exceptional high bandwidth and superior transmission performance for the most demanding applications, while allowing the use of low-cost, high-speed 850 nm vertical cavity surface-emitting lasers (VCSELs).

### High Bandwidth Performance You Can Rely On

Corning is a world leader in developing and using the most advanced measurement techniques for laser-optimized multimode fibers. Corning uses direct manufacturing process control and integrated measurement techniques for all ClearCurve fibers to ensure robust performance in laser-based systems.

We ensure EMB via calculated effective modal bandwidth (minEMBc) for all our ClearCurve multimode optical fibers. minEMBc is a differential mode delay (DMD) - 100% measured bandwidth method that best predicts multimode performance in high-bandwidth laser-based systems up to and including 100 Gb/s. Corning was the first optical fiber manufacture to provide customers with minEMBc measured bandwidth values for individual laser-optimized multimode fibers.

### Optical Specifications

Bandwidth	High Performance EMB*	Legacy Performance EMB**	
	(MHz.km)	850 nm	1300 nm
<b>Corning Optical Fiber</b>	<b>850 nm only</b>		
ClearCurve® OM4 fiber	4700	3500	500
ClearCurve® OM3 fiber	2000	1500	500
ClearCurve® OM2 fiber	950	700	500

\*Ensured via minEMBc, per TIA/EIA 455-220A and IEC 60793-1-49, for high performance laser-based systems (up to 100 Gb/s).

\*\*OFL BW, per TIA/EIA 455-204 and IEC 60793-1-41, for legacy and LED-based systems (typically up to 100 Mb/s).

### Attenuation

Wavelength (nm)	Maximum Value (dB/km)
850	≤ 2.3
1300	≤ 0.6

No point discontinuity greater than 0.2 dB. Attenuation at 1380 nm does not exceed the attenuation at 1300 nm by more than 3.0 dB/km.

### Macrobend Loss

Mandral Radius (mm)	Number of Turns	Induced Attenuation (dB)	
		850 nm	1300 nm
37.5	100	≤ 0.05	≤ 0.15
15	2	≤ 0.1	≤ 0.3
7.5	2	≤ 0.2	≤ 0.5

### Numerical Aperture

0.200 ± 0.015

### Dimensional Specifications

#### Glass Geometry

Core Diameter	50.0 ± 2.5 μm
Cladding Diameter	125.0 ± 1.0 μm
Core-Clad Concentricity	≤ 1.5 μm
Cladding Non-Circularity	≤ 1.0%
Core Non-Circularity	≤ 5%

#### Coating Geometry

Coating Diameter	242 ± 5 μm
Coating-Cladding Concentricity	≤ 12 μm

## Environmental

Environmental Test	Test Condition	Induced Attenuation 850 nm & 1300 nm (dB/km)
Temperature Dependence	-60°C to +85°C	≤ 0.10
Temperature Humidity Cycling	-10°C to +85°C and 4% to 98% RH	≤ 0.10
Water Immersion	23°C ± 2°C	≤ 0.20
Heat Aging	85°C ± 2°C	≤ 0.20
Damp Heat	85°C at 85% RH	≤ 0.20

Operating Temperature Range: -60°C to +85°C

## Mechanical Specifications

### Proof Test

The entire fiber length is subjected to a tensile stress ≥ 100 kpsi (0.7 GN/m<sup>2</sup>)\*.

\*Higher proof test levels available.

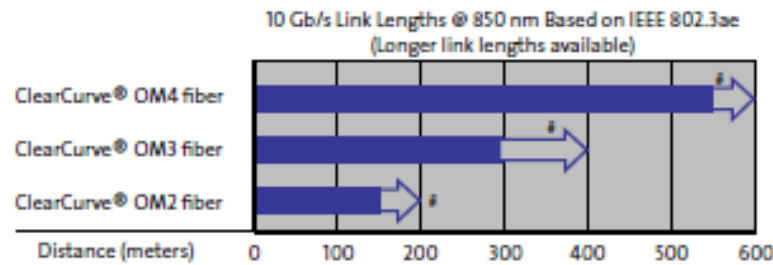
### Length

Fiber lengths available up to 17.6 km/spool.

## Performance Characterizations

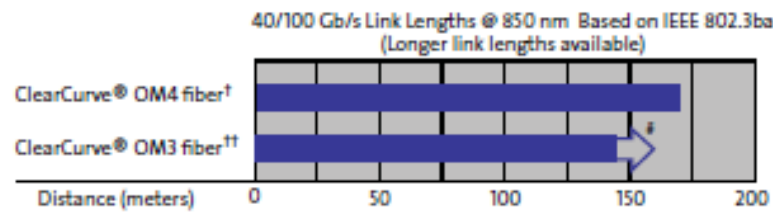
Characterized parameters are typical values.

### System Link Length



#Additional system reach capable with ClearCurve OM2/OM3/OM4 fiber reel-specific bandwidth metric and values as provided by Corning (subject to availability).

\*10 Gb/s link length show for ClearCurve OM4 fiber require cable attenuation ≤ 3.0 dB/km and total connector loss ≤ 1.0 dB.



#Additional system reach capable with ClearCurve OM3/OM4 fiber reel-specific bandwidth metric and values as provided by Corning (subject to availability).

\* OM2 is not included in the IEEE 802.3ba Standard for 40/100 Gb/s systems.

†† Link lengths as characterized in IEEE 802.3ae (10 Gigabit Ethernet) and IEEE 802.3ba (40 and 100 Gigabit Ethernet) for ClearCurve multimode fiber-specific bandwidth metrics and standards compliant components.

\*\*\*40 Gb/s and 100 Gb/s link lengths shown for ClearCurve OM3 and ClearCurve OM4 fiber systems require cable attenuation ≤ 3.0 dB/km and total connector loss ≤ 1.0 dB.

† OM4 requires 1.0 dB of connector loss.

†† OM3 allows for 1.0 dB of connector loss.



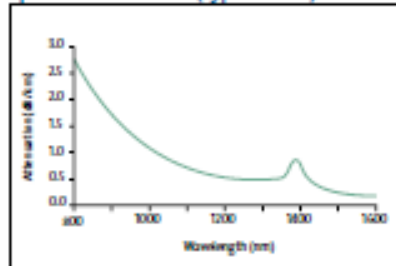
Refractive Index Difference	1%
Effective Group Index of Refraction ( $N_{eff}$ )	850 nm: 1.480 1300 nm: 1.479
$N_{eff}$ was empirically derived to the third decimal place using a specific commercially available OTDR	
Fatigue Resistance Parameter ( $n_d$ )	20
Coating Strip Force	Dry: 0.6 lbs (2.7N) Wet, 14 days in 23°C water soak: 0.6 lbs (2.7N)

#### Chromatic Dispersion

Zero Dispersion Wavelength ( $\lambda_0$ ):  $1295 \text{ nm} \leq \lambda_0 \leq 1315 \text{ nm}$

Zero Dispersion Slope ( $S_0$ ):  $\leq 0.101 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$

#### Spectral Attenuation (Typical Fiber)



## Corning® InfiniCor® 62.5 µm Optical Fibers

### Product Information

CORNING



### How Do You Measure Trust? Gb/s Works for Us.

In today's enterprise networks, bandwidth demands are growing – rapidly. That's because end-user productivity is increasingly dependent on instant accessibility and high throughput of information. Narrow bandwidth constricts your capacity to succeed. Corning's 62.5 µm InfiniCor® fibers, the world's first laser-optimized™ 62.5 µm multimode fibers, help you to stay ahead of escalating network demands with:

- Greater distance capability at data rates up to 1 Gb/s in both the 850 and 1300 nm windows
- Higher data aggregation in the backbone, riser and horizontal, compared with non-laser-optimized fibers
- Full compatibility with the broad range of laser-based and legacy protocols and applications
- Superior measurement technology and manufacturing control
- Industry-leading CPC® cabling for superior microbend and environmental performance

	InfiniCor® CL™ 1000 fiber	InfiniCor® 300 fiber
Optimized Data Rate over Distance	1 Gb/s over 500 m at 850 nm 1 Gb/s over 1000 m at 1300 nm	1 Gb/s over 300 m at 850 nm 1 Gb/s over 550 m at 1300 nm
Standards Compliance*		
ISO/IEC 11801	type OM1 fiber	type OM1 fiber
IEC 60793-2-30	type A1b fiber	type A1b fiber
TIA/EIA 492AAAA-A	492AAAA-A	492AAAA-A

\*Corning InfiniCor 62.5 µm laser-optimized™ fibers meet or exceed standards requirements for the fiber specifications listed.

### Optical Specifications

Bandwidth	Intermediate Performance EMB* (MHz·km)	Legacy Performance EMB** (MHz·km)
Corning Optical Fiber	850 nm Only	850 nm 1300 nm
InfiniCor CL 1000 fiber	385	200 500
InfiniCor 300 fiber	220	200 500

\*RML BW, per TIA/EIA 455-204 and IEC 60793-1-41, for intermediate performance laser-based systems (typically up to 1 Gb/s).

\*\*OFL BW, per TIA/EIA 455-204 and IEC 60793-1-41, for legacy and LED-based systems (typically up to 100 Mb/s).

Attenuation	Wavelength (nm)	Maximum Value (dB/km)
	850	≤ 2.9
	1300	≤ 0.6

No point discontinuity greater than 0.2 dB.

Attenuation at 1300 nm does not exceed the attenuation at 1300 nm by more than 1.0 dB/km.

Induced attenuation from 100 turns around a 75 mm mandrel shall be ≤ 0.5 dB at 850 nm and 1300 nm.

### Numerical Aperture

0.275 ± 0.015

### How to Order

Contact your sales representative, or call the Optical Fiber Customer Service Department.  
Pfx: 1-800-248-2000 (U.S. and Canada)  
+44-1294-525-320 (Europe)

Email: [cofi@corning.com](mailto:cofi@corning.com)  
Please specify the fiber type, attenuation, and quantity when ordering.

PI1458 | ISSUED: JULY 2011  
SUPERSEDES: AUGUST 2009

TL9000/ISO 9001 REGISTERED



## Dimensional Specifications

Glass Geometry		Coating Geometry	
Core Diameter	62.5 ± 2.5 µm	Coating Diameter	242 ± 5 µm
Cladding Diameter	125.0 ± 2.0 µm	Coating-Cladding Concentricity	< 12 µm
Core-Clad Concentricity	≤ 1.5 µm		
Cladding Non-Circularity	≤ 1.0%		
Core Non-Circularity	≤ 5%		

## Environmental Specifications

Environmental Test	Test Condition	Induced Attenuation 850 and 1300 nm (dB/km)
Temperature Dependence	-60°C to +85°C*	≤ 0.10
Temperature Humidity Cycling	-10°C to +85°C* and 4% to 98% RH	≤ 0.10
Water Immersion	23 ± 2°C	≤ 0.20
Heat Aging	85 ± 2°C*	≤ 0.20
Damp Heat	85°C at 85% RH	≤ 0.20

Operating Temperature Range: -60°C to +85°C

## Mechanical Specifications

### Proof Test

The entire fiber length is subjected to a tensile stress  
≥ 100 kpsi (0.7 GN/m<sup>2</sup>).

\*Higher proof test levels available.

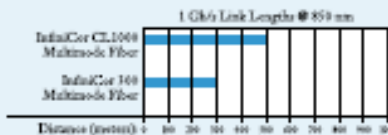
### Length

Fiber lengths available up to 17.6 km/spool.

## Performance Characterizations

Characterized parameters are typical values.

### Link Length



Link Lengths as characterized in IEEE 802.3z  
(Gigabit Ethernet) for product-specific bandwidth  
metrics and values provided in this document.

Refractive Index Difference 2%

Effective Group Index  
of Refraction (N<sub>eff</sub>) 850 nm: 1.496  
1300 nm: 1.491

N<sub>eff</sub> was empirically derived to the third decimal place  
using a specific commercially available OTDR.

Fatigue Resistance Parameter (N<sub>f</sub>) 20

Coating Strip Force Dry: 0.6 lbs. (2.7N)  
Wet, 14 days in 23°C  
water soak: 0.6 lbs. (2.7N)

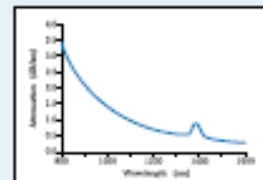
Rayleigh Backscatter  
Coefficient 850 nm: -68 dB  
(for 1 ns Pulse Width) 1300 nm: -76 dB

### Chromatic Dispersion

Zero Dispersion Wavelength (λ<sub>0</sub>): 1332 nm ≤ λ<sub>0</sub> ≤ 1354 nm

Zero Dispersion Slope (S<sub>0</sub>): ≤ 0.097 ps/(nm<sup>2</sup>·km)

### Spectral Attenuation (Typical Fiber)



## Formulas

### Dispersion

$$\text{Dispersion} = D(\lambda) = \frac{S_2}{\lambda^2} \left[ \lambda - \frac{\lambda_0^2}{\lambda} \right] \text{ ps/(nm·km)},$$

for 750 nm ≤ λ ≤ 1450 nm

λ = Operating Wavelength

### Cladding Non-Circularity

$$\text{Cladding Non-Circularity} = \left[ \frac{\text{Max. Cladding Diameter} - \text{Min. Cladding Diameter}}{\text{Max. Cladding Diameter}} \right] \times 100$$

CORNING

Corning Incorporated  
One Riverfront Plaza  
Corning, NY 14831 U.S.A.  
Ph: 607-286-2000 (U.S. and Canada)  
+44-1286-525-120 (Europe)  
Email: corning@corning.com  
www.corning.com/fiber

Corning and IndusCor are registered trademarks of Corning Incorporated, Corning, NY.  
© 2017 Corning Incorporated

## **10 / Revista**

### **Sumario**

- GUI OTDR

## **10.1 / GUI OTDR**

Este es el primer proyecto fin de carrera basado en este tema y será llevado a cabo en dos fases. La primera, comprenderá el estudio teórico del OTDR, así como, de los parámetros necesarios para comprender el mismo. La segunda parte será la realización de una interfaz gráfica en Matlab (GUI), en la que se puedan seleccionar distintos tipos de fibra óptica, así como, conectores y empalmes. Como ampliación de la segunda fase se simularán enlaces con las características que introduzca el usuario por pantalla, pero con la particularidad de que será el usuario el encargado de calcular los valores de atenuación de los componentes, distancia de una posible rotura....

### **Introducción**

El OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) es un instrumento que envía un pulso de luz de corta duración al dispositivo bajo prueba y mide, en función del tiempo, la señal óptica retrodispersada. A medida que el pulso óptico se propaga a lo largo de la fibra, parte de su energía es retro-reflejada (reflejada en la dirección opuesta a la del haz incidente) debido en gran medida a la dispersión de Rayleigh y a las reflexiones de Fresnel. Las características del haz retrodispersado permiten determinar la magnitud y localización de eventuales zonas de pérdidas a lo largo de la fibra.

La siguiente figura muestra un diagrama de bloques de un OTDR genérico. Se utiliza un generador de pulsos activado por la unidad de procesamiento de señales para modular la intensidad de un láser. La señal de prueba convencional es un pulso cuadrado con duración de entre 5ns y 10µs que depende de la resolución espacial y la sensibilidad requerida para la medición. Está equipado con uno o dos láseres de diferentes longitudes de onda (típicamente de 1310 nm y 1550 nm) que combina en un solo haz mediante un acoplador para la multicanalización por división en longitud de onda.

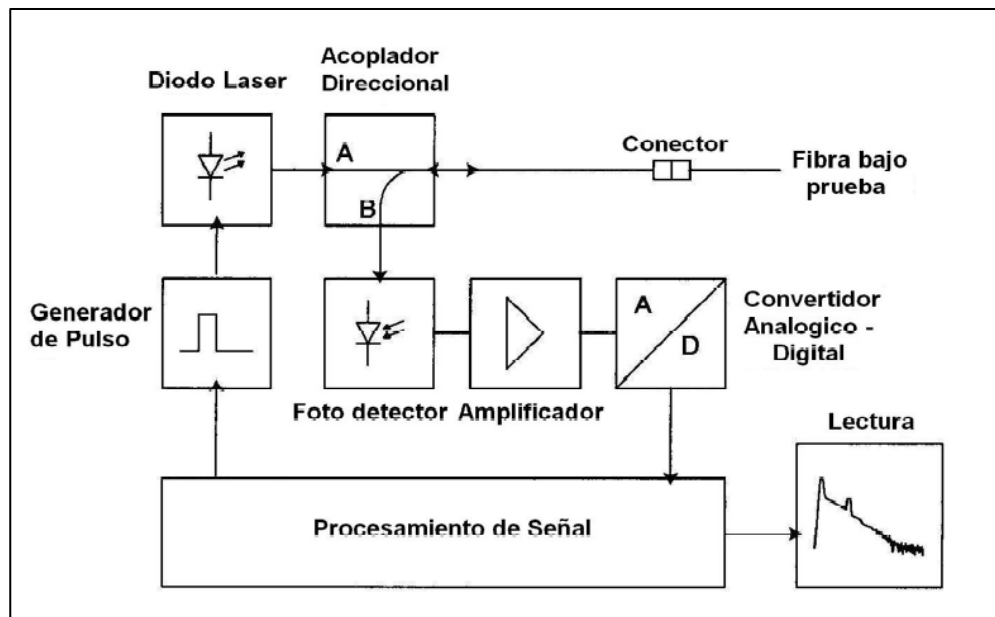


Figura 1 Diagrama de bloques de un OTDR. Ref. [5] p.18

Comúnmente, la curva de respuesta exhibe tres formas características: la línea recta con una pendiente, causada por la distribución de la retrodispersión de Rayleigh; los picos positivos causados por reflexiones debidas a conectores y, finalmente, un escalón que puede ser negativo dependiendo de las propiedades físicas de la fibra.

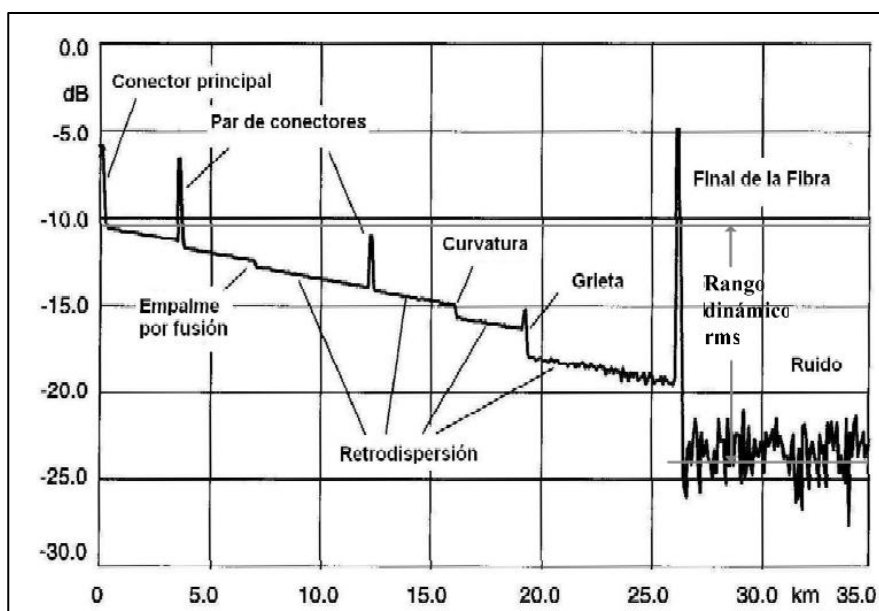


Figura 2 Curva típica de un OTDR. Ref. [5] p.20

El primer evento que se puede observar en la lectura del OTDR es una reflexión del conector principal que acompaña al OTDR en la realización de la prueba de la fibra. Este evento indeseable puede ser minimizado mediante limpieza en las conexiones y el empleo de conectores de elevada calidad.

Hay eventos no debidos a reflexiones, que muestran pérdidas puras, tales como las curvaturas y los empalmes por fusión. La existencia de reflexiones, depende de las condiciones de la superficie de la fibra y de las conexiones entre dos segmentos por ejemplo empalmes mecánicos y conectores. Una transición vidrio-aire, puede provocar reflexiones de hasta un 4% de la potencia óptica incidente.

Dependiendo del ancho del pulso que se emita desde el OTDR se obtendrá una mejor resolución a la hora de la visualización, cuanto más estrecho sea el pulso mejor será la visualización.

### **Análisis de la señal retrodispersada**

Para entender la localización de algún punto de la fibra del OTDR, consideremos el frente principal de un pulso geométrico con un ancho  $W$  donde recorrerá una distancia en  $T$  segundos hacia delante y la misma distancia en  $T$  segundos hacia atrás. Cuando el pulso de luz es retrodispersado y llega hasta al punto de inicio, este pulso de luz con retrodispersión recorrió dos veces la misma longitud en un tiempo  $2T$  y tendrá la suma de todas sus potencias de la luz con retrodispersión. Así, tomamos  $dP_s = kP(z)dz$  para aplicar la integral y un cambio de variable de su intervalo inferior 0 y superior  $W$ . La suma de integral de la potencia de luz con retrodispersión de un pulso con ancho  $W$  en una distancia que se transmitió en una fibra con parámetros definidos es

(1.1)

$$P_s(L) = \int_0^W S \alpha_s P_0 e^{-2\alpha(L + \frac{z}{2})} dz$$

Al desarrollar esta ecuación obtenemos dos ecuaciones. La primera considera que la mitad del ancho del pulso es inferior o igual a la distancia que recorrerá el pulso.

(1.2)

$$P_s(l) = S \frac{\alpha_s}{\alpha} P_0 e^{-2\alpha l} [1 - e^{-\alpha W}] \text{ para } l \geq W/2$$

O en su forma aproximada para cuando  $\alpha W \ll l$

(1.3)

$$P_s(l) = S \alpha_s W P_0 e^{-2\alpha l}$$

Y cuando las distancias son menores que la mitad del ancho del pulso  $W/2$  se obtiene,

(1.4)

$$P_s(l) = S \frac{\alpha_s}{\alpha} P_0 e^{-2\alpha W} [1 - e^{-\alpha l}] \text{ para } 0 \leq l \leq W/2$$



En su forma de aproximación para cuando  $l = w/2$  y  $\alpha W \ll l$  el valor inicial de la potencia retrodispersada es,

(1.5)

$$P_{init} = S\alpha_s W P_0$$

Las aproximaciones de las ecuaciones (1.4) y (1.5) muestran el factor ancho del pulso, la potencia de retrodispersión es proporcional a la duración del pulso  $\tau$ ,  $W = \tau v_{ngr} = \tau \frac{c}{n_{gr}}$ .

Estas ecuaciones se utilizan y proporcionan suficiente exactitud para aplicaciones del OTDR.

Por último, si consideramos una excitación por CW (onda continua) a la entrada de la fibra, podemos realizar la estimación de las pérdidas de regreso con la potencia total de retrodispersión,  $P_{S,total}(L)$  en una fibra con longitud  $L$ . Entonces podemos tomar dentro de la integración en la ecuación  $P_S(L) = \int_0^W S \alpha_s P_0 e^{-2\alpha(L+\frac{z}{2})} dz$  los límites 0 y  $L$ .

(1.6)

$$P_{S,total}(L) = \frac{1}{2\alpha} S \alpha_s P_0 [1 - e^{-2\alpha L}]$$

El término exponencial  $e^{-2\alpha L}$  indica que las fibras con muy grandes longitudes  $\alpha L \gg 1$ , tienen un valor de potencia de retrodispersión donde dependen del coeficiente de captura  $S$ , coeficiente de atenuación  $\alpha_s$  y coeficiente de atenuación por dispersión de Rayleigh  $\alpha$ .

### **Interfaz gráfica (GUI)**

La GUI desarrollada se puede dividir en tres bloques: la parte de la caracterización de la simulación, una parte de datos de interés y una parte utilizada para una mejor visualización de los detalles. En la primera escogemos los datos del enlace de fibra óptica a visualizar en el gráfico, a la derecha del gráfico se muestran parámetros característicos del enlace de fibra óptica y en la parte superior izquierda podemos observar los botones que nos permitirán aumentar y disminuir el zoom, así como desplazarnos por la gráfica y colocar un cursor para obtener valores en distintos puntos del enlace.

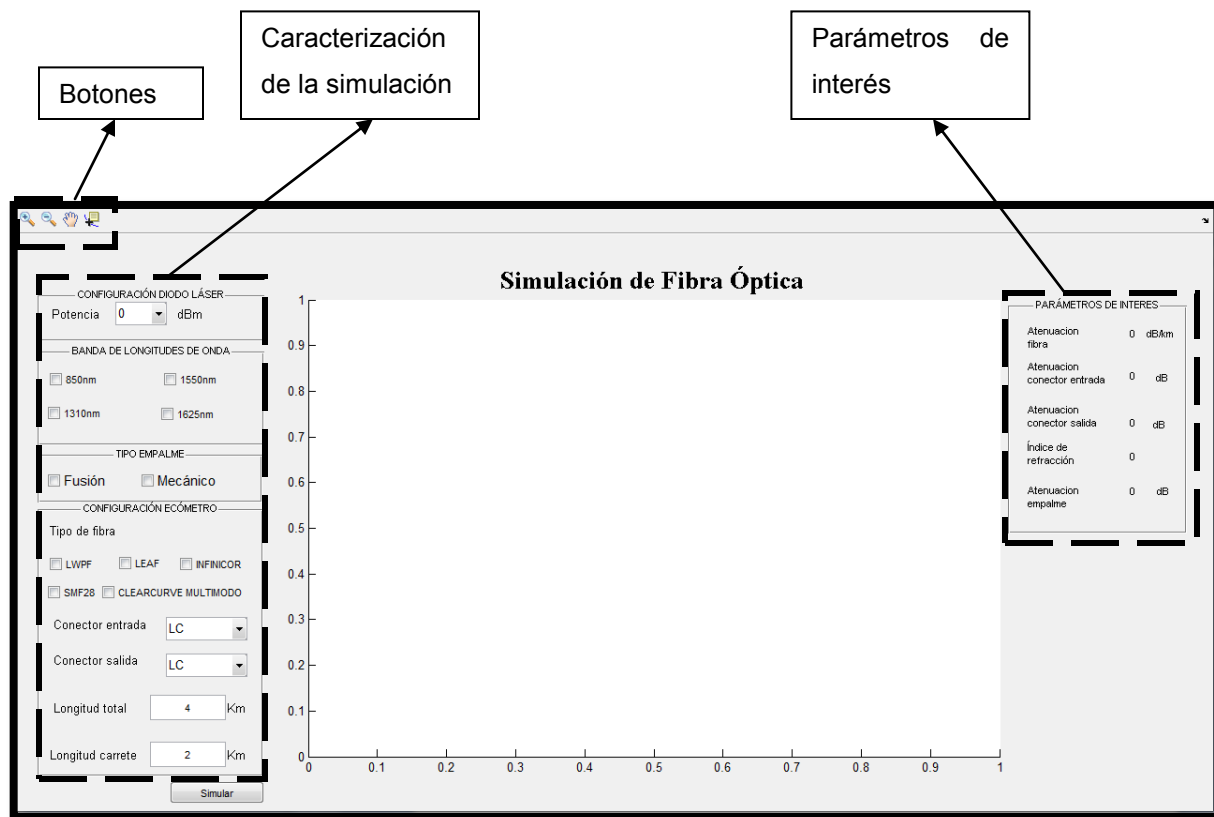


Figura 3 Pantalla principal de la GUI

A continuación, se explicarán distintos resultados obtenidos mediante la interfaz desarrollada en Matlab:

En el primero, se ve un ejemplo sencillo con pocos tramos de fibra óptica donde se observa una atenuación muy reducida y un nivel de ruido muy bajo, debido a los altos niveles de potencia, en comparación con el nivel de ruido, presente a lo largo de todo el enlace.

En el segundo caso, se puede apreciar que la distancia del enlace de fibra óptica es mucho mayor y por ello el nivel de ruido va aumentando al disminuir la potencia ya que no colocamos ningún EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) que amplifique la misma. Las prestaciones irían decayendo hasta el punto de no ser posible la transmisión como se observa en el último ejemplo, en el que las pérdidas de la fibra óptica son mucho mayores y la potencia transmitida va decayendo hasta encontrarse por debajo del suelo de ruido por lo que la transmisión no sería viable y se deberían buscar alternativas, por ejemplo, colocar

EDFAS o sustituir la fibra por una de mejores prestaciones, teniendo muy presente los costes que acarrearía todo esto.

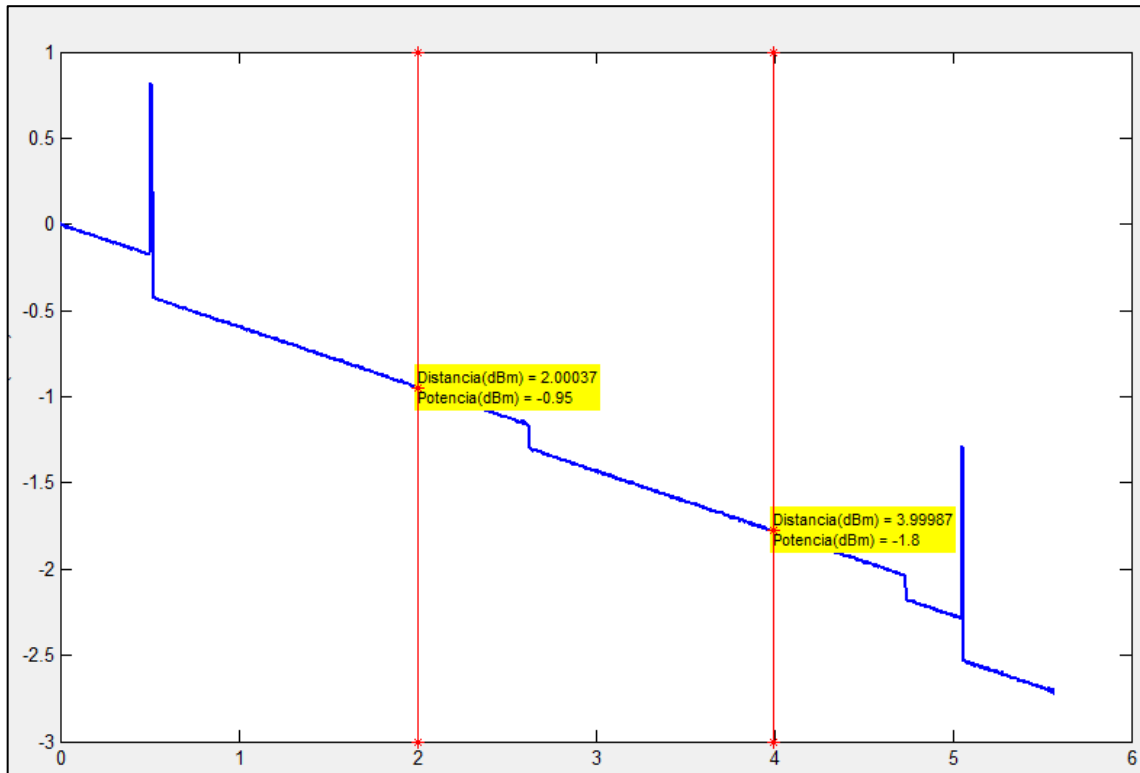


Figura 4 Ejemplo de la interfaz. Enlace corto

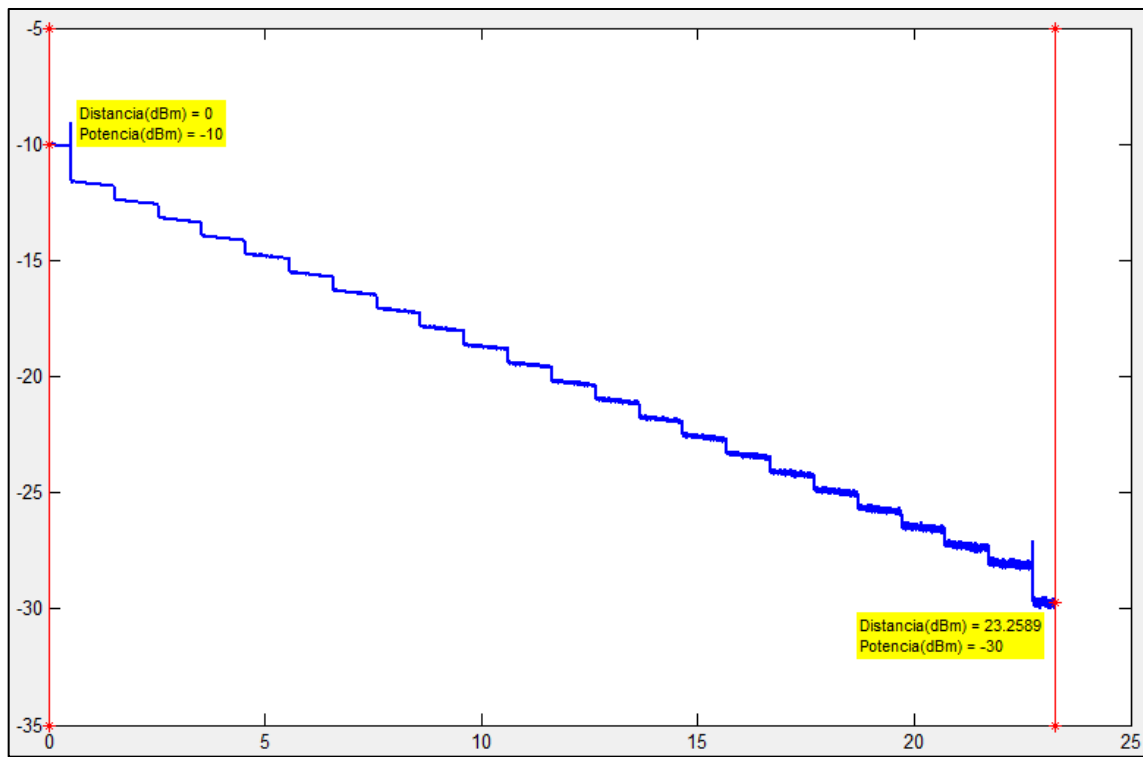


Figura 5 Ejemplo de la interfaz. Enlace largo poco ruidoso

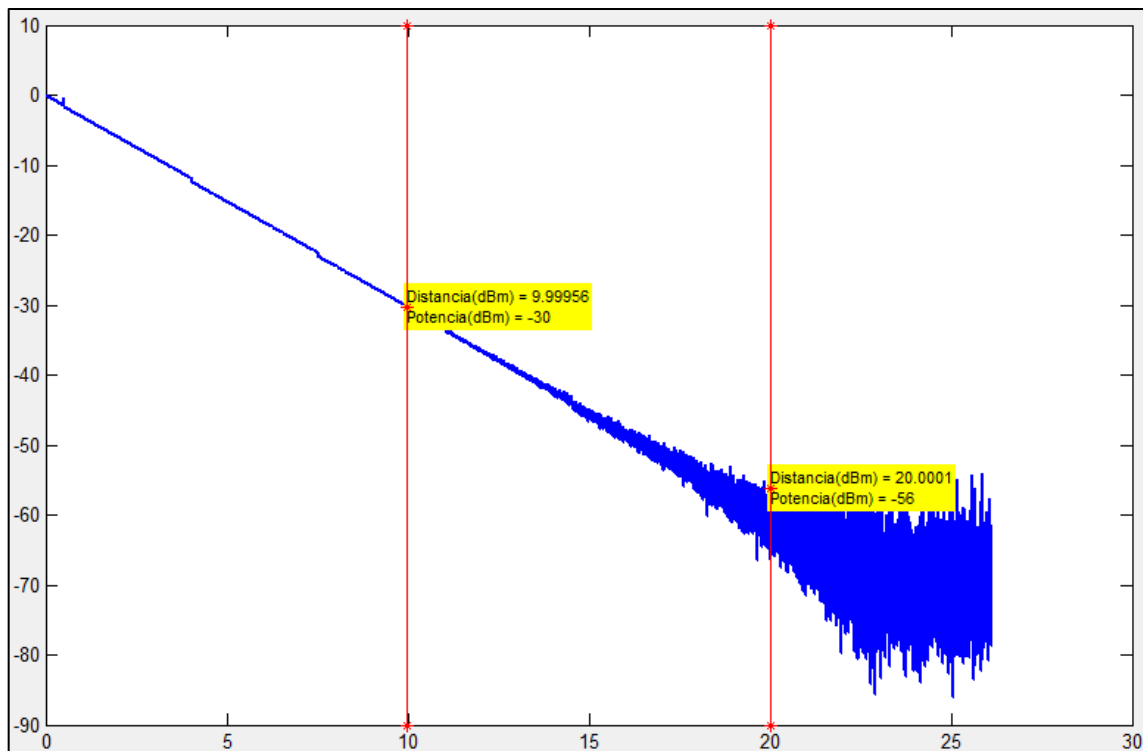


Figura 6 Ejemplo de la interfaz. Enlace largo poco ruidoso

Para concluir podemos sacar varias conclusiones:

- OTDR es muy útil a la hora de caracterizar un enlace de fibra óptica ya que se puede ver el comportamiento real de cada uno de los elementos, así como, detectar cualquier suceso anómalo o rotura.
- Los EDFAS empiezan a ser necesarios a medida que alcanzamos niveles de potencia más cercanos al nivel de ruido.
- Si conocemos la velocidad por la que se transmite la luz por la fibra óptica podremos delimitar con bastante exactitud el lugar de una posible rotura.

## **Bibliografía**

**[Dutton 98]** Harry J. R. Dutton, "Understanding Optical Communications", IBM, 1998.

**[DeCusatis 02]** Casimer DeCusatis, "Handbook of Fiber Optic Data Communicationas", IBM, Academic Press, 2002.

**[Miranda 02]** José Miguel Miranda, José Luis Sebastián, Manuel Sierra, José Margineda "Ingeniería de Microondas, Técnicas experimentales", Prentice Hall 2002.

**[Goff 02]** D. R. Goff, "Fiber Optic Reference Guide" D. R. Goff", *Focal Press*, Tercera edición, 2002.

**[Morales 06]** Carlos Morales Carvajal , "Estudio de la exactitud y precisión para localización de perturbaciones basadas en el método análisis por transmisión - reflexión (MATR) en un sensor de fibra óptica distribuido", Tesis Doctoral, C.I.C.E.S.E. (Centro de investigación científica y de educación superior de Ensenada) , 2006.